

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO RIO GRANDE DO SUL
UNIDADE UNIVERSITÁRIA EM PORTO ALEGRE
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA**

KAROLAINE AGUIAR DOS SANTOS

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROCESSO TERMOMECÂNICO PARA
REUTILIZAÇÃO DO VIDRO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS OBSOLETOS E
CARACTERIZAÇÃO ÓPTICA DO VIDRO RECUPERADO.**

PORTO ALEGRE

2022

KAROLAINÉ AGUIAR DOS SANTOS

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROCESSO TERMOMECÂNICO PARA
REUTILIZAÇÃO DO VIDRO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS OBSOLETOS E
ANÁLISE ÓPTICA DO VIDRO RECUPERADO.**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)
apresentado como requisito parcial de
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia de Energia na Universidade
Estadual do Rio Grande do Sul.

Orientador: Prof. Dra. Lúcia Allebrandt da
Silva Ries

Coorientador: Prof. Dr. Fabiano Perin
Gasparin

PORTO ALEGRE

2022

KAROLAINE AGUIAR DOS SANTOS

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROCESSO TERMOMECÂNICO PARA
REUTILIZAÇÃO DO VIDRO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS OBSOLETOS E
ANÁLISE ÓPTICA DO VIDRO RECUPERADO.**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)
apresentado como requisito parcial de
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia de Energia na Universidade
Estadual do Rio Grande do Sul.

Orientador: Prof. Dra. Lúcia Allebrandt da
Silva Ries

Coorientador: Prof. Dr. Fabiano Perin
Gasparin

Aprovado em: ___/___/___

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Elton Gimenez Rossini

Universidade Estadual do Rio Grande do Sul – UERGS

Prof. Dr. Fernando Schuck de Oliveira

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço à minha mãe Elisabeth Santos por todo apoio ao longo dessa trajetória. Sou extremamente grata pela tua dedicação para a minha formação moral e profissional.

Agradeço à orientadora Prof. Dra. Lúcia Allebrandt da Silva Ries por ter sido a minha inspiração, e por ter despertado o meu interesse pela ciência dos materiais. Sou grata por ter me dado diversos conselhos importantes dos quais não me esquecerei, obrigada pela parceria e apoio ao longo de todo o trabalho.

Agradeço ao meu coorientador Prof. Dr. Fabiano Perin Gasparin pela disponibilidade e disposição, sou grata por todo esforço e interesse dedicado a esse trabalho, obrigada pelas excelentes dicas.

Agradeço ao Prof. Dr. e Amigo Eder Julio Kinast por ter me acompanhado e aconselhado ao longo de todos os anos da graduação, a tua simpatia e alegria são cativantes.

Agradeço à Universidade Estadual do Rio Grande do Sul por ter me proporcionado o curso de Engenharia de Energia.

Agradeço a todos meus amigos que estiveram comigo nesta reta final.

RESUMO

O emprego de módulos fotovoltaicos para a geração de eletricidade a partir da energia solar segue em expansão no mundo todo. O aproveitamento da energia solar é uma alternativa promissora de energia renovável, pois apresenta custos relativamente baixos e baixa complexidade de implantação. Apesar das vantagens desta tecnologia, os módulos fotovoltaicos apresentam um tempo de vida útil limitado (25-30 anos), e está previsto para a próxima década uma grande quantidade desses equipamentos fora de operação. Diversos estudos estão sendo conduzidos para avaliar a reciclagem dos módulos fotovoltaicos, com o intuito de recuperar seus materiais nobres. Sob esses aspectos, o propósito deste trabalho foi desenvolver uma rota termomecânica que permitisse a recuperação do vidro do módulo fotovoltaico com a moldura de alumínio, e analisar as características ópticas do vidro recuperado para a aplicação em estufas de cultivo protegido. A rota termomecânica utilizada para recuperar o vidro foi constituída por dois processos principais: (1) o aquecimento do módulo fotovoltaico numa estufa, e (2) a raspagem das camadas traseiras com o auxílio de uma espátula. A rota foi dividida em etapas, sendo as duas principais a remoção da carcaça da caixa de junção e do *backsheet* (tedlar) com o módulo a 150°C, e a remoção do EVA e células de silício a 210°C. O vidro recuperado dos módulos A (policristalino) e B (monocristalino) não apresentou diferenças físicas visíveis entre si, mesmo ambos sendo de fabricantes diferentes. De forma geral, o processo termomecânico desenvolvido se mostrou eficaz para a recuperação não destrutiva do vidro com a moldura de alumínio. Para a análise óptica do vidro recuperado, foi utilizada uma esfera integradora para realizar os ensaios de transmissividade total e transmissividade difusa. Os resultados obtidos demonstraram que os vidros recuperados são difusos, com aproximadamente 66-68% de taxa de difusibilidade (*Haze*), apresentam em torno de 90% de transmissividade total e transmissividade difusa em torno de 73 a 78%. As características apresentadas pelos vidros recuperados apontam um grande potencial de aplicação destes vidros em estufas de cultivo protegido. Além disso, alta difusibilidade e transmissividade apresentadas pode ser uma característica aliada à sua aplicação em diferentes climas.

Palavras-chave: Resíduos Fotovoltaicos, Reutilização de Vidro, Processos Termomecânicos, Módulos Fotovoltaicos.

ABSTRACT

The use of photovoltaic modules to generate electricity from solar energy continues to expand worldwide. The use of solar energy is a promising renewable energy alternative, as it has relatively low costs and low implementation complexity. Despite the advantages of this technology, photovoltaic modules have a limited lifetime (25-30 years), and a large amount of this equipment is expected to be out of operation for the next decade. Several studies are being conducted to evaluate the recycling of photovoltaic modules, to recover their noble materials. Under these aspects, the purpose of this work was to develop a thermomechanical route that would allow the recovery of the photovoltaic module glass with the aluminum frame and analyze the optical characteristics of recovered glass for application in protected cultivation greenhouses. The thermomechanical route used to recover the glass consisted of two main processes: (1) heating the photovoltaic module in an oven, and (2) scraping the back layers with the aid of a spatula. The route was divided into steps, the two main ones being the removal of the junction box housing and the backsheet (tedlar) with the module at 150°C, and the removal of the EVA and silicon cells at 210°C. The glass recovered from modules A (polycrystalline) and B (monocrystalline) did not show visible physical differences between them, even though both were from different manufacturers. In general, the thermomechanical process developed proved to be effective for the non-destructive recovery of glass with an aluminum frame. For the optical analysis of the recovered glass, an integrating sphere was used to carry out the tests of total transmissivity and diffuse transmissivity, the obtained results demonstrated that the recovered glasses are diffuse, with approximately 66-68% of diffusibility rate (Haze), present around 90% of total transmissivity and diffuse transmissivity around 73 to 78%. The characteristics presented by the recovered glasses point to a great potential for the application of these glasses in greenhouses. In addition, the high diffusivity and transmissivity presented may be an interesting feature for its application in different climates.

Keywords: Photovoltaic Waste, Glass Recovery, Recycling, Thermomechanical Processes, Photovoltaic Modules.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Arranjo de células e módulos FV	4
Figura 2 – Percentual em massa dos materiais utilizados em módulos FV de diferentes tecnologias	5
Figura 3 - Células de silício multicristalino e monocristalino.	6
Figura 4 - Zona de depleção formada na junção p-n.....	8
Figura 5 - Esquema do funcionamento de uma célula FV.....	8
Figura 6 - Circuito elétrico esquemático de uma Célula FV	9
Figura 7 - Componentes de um módulo fotovoltaico de silício cristalino	9
Figura 8 - Estrutura da célula fotovoltaica de silício	10
Figura 9 – Vista frontal dos módulos A e B utilizados.	16
Figura 10 - Vista posterior dos módulos A e B utilizados.	16
Figura 11 - Caixa de junção e seus componentes	18
Figura 12 – Backsheet do módulo A após a remoção da caixa de junção	18
Figura 13 - Área do módulo A após remoção do backsheet (TedLar).....	19
Figura 14 – Área do Módulo A após remoção das camadas de EVA e de células de Si.	19
Figura 15 – Vista frontal do Módulo A após remoção das camadas de EVA e de células de Si, numa área pontual.	20
Figura 16 – Diagrama do processo termomecânico desenvolvido para recuperação integral do vidro com a moldura de alumínio, mostrando os materiais/equipamentos utilizados	21
Figura 17 - Estufa utilizada no processo térmico.....	22
Figura 18 - Módulo A sendo colocado na estufa	22
Figura 19 - Backsheet do módulo B sendo removido	23
Figura 20 - Módulos A e B sem o backsheet.....	23
Figura 21 - EVA e células de Si sendo removidas do módulo A	24
Figura 22 - Fragmentos do EVA e das células de Si após remoção do módulo A	24
Figura 23 - Módulos A e B após a remoção do EVA e células de Si.....	24
Figura 24 – Amostra B, parte do EVA impregnado removido.....	25
Figura 25 - Desenho esquemático do aparato experimental utilizado.....	26
Figura 26 - Imagem do aparato experimental montado.....	26
Figura 27 - Armadilha de captura de luz utilizada.	27

Figura 28 - Tubo colimador desenvolvido para o experimento.....	27
Figura 29 - Base para posicionamento da célula FV	28
Figura 30 - Célula FV posicionada no interior da esfera integradora.	28
Figura 31 - Interior da esfera integradora	29
Figura 32 - Amostra de vidro sodo-cálcico	29
Figura 33 - Esquema para medição da luz incidente total.....	30
Figura 34 - Esquema para medição da transmissividade total das amostras	31
Figura 35 - Esquema para medição do ruído.	31
Figura 36 - Esquema para medição da transmissividade difusa.	32
Figura 37 - Piranômetro utilizado no trabalho.....	34
Figura 38 - Cabine ajustável para possibilitar incidência apenas de radiação solar direta	34
Figura 39 - Piranômetro e cabine alinhados.....	35
Figura 40 - Amostra de vidro sodo-cálcico posicionada na cabine.....	35
Figura 41 - Vidro do módulo recuperado com a moldura de alumínio.....	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Cotação dos Materiais contidos nos módulos fotovoltaicos de silício cristalino	11
Tabela 2 - Características dos módulos A e B.	17
Tabela 3 - Dados obtidos nos ensaios de transmissividade da amostra A	38
Tabela 4 - Dados obtidos nos ensaios de transmissividade difusa da amostra A.....	39
Tabela 5 -Dados obtidos nos ensaios de transmissividade da amostra B	39
Tabela 6 - Dados obtidos nos ensaios de transmissividade difusa da amostra B.....	40
Tabela 7 - Dados obtidos nos ensaios de transmissividade da amostra de vidro sodo-cálcico (esfera integradora).....	40
Tabela 8 - Dados obtidos nos ensaios de transmissividade da amostra de vidro sodo-cálcico (piranômetro).....	40
Tabela 9 - Resultados obtidos da amostra A.....	41
Tabela 10 - Resultados obtidos da amostra B.....	41
Tabela 11 - Resultados obtidos da amostra de vidro sodo-cálcico	42

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
2.1. OBJETIVO GERAL.....	3
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1. MÓDULOS FOTOVOLTAICOS.....	4
3.1.1. Princípios de funcionamento das células FV	7
3.1.2. Composição dos Módulos Fotovoltaicos c-Si	9
3.2. RECICLAGEM DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS.....	12
3.2.1. Cenário de resíduos fotovoltaicos	12
3.2.2. Legislação e regulamentação	13
3.3. ESTUFAS DE CULTIVO PROTEGIDO	13
3.3.1. Estufas de vidro difuso	14
4. MATERIAIS E MÉTODOS	16
4.1. ESPECIFICAÇÕES DOS MÓDULOS FV.....	17
4.2. RECUPERAÇÃO DO VIDRO COM MOLDURA DE ALUMÍNIO - PROCESSO TERMOMECÂNICOS.....	17
4.2.1. Análise Experimental Prévia	17
4.2.2. Teste e desenvolvimento do processo termomecânico	20
4.2.2.1. <i>Remoção dos componentes internos da caixa de junção.</i>	22
4.2.2.2. <i>Remoção do backsheet e da carcaça da caixa de junção.</i>	22
4.2.2.3. <i>Remoção do EVA e das Células de Si</i>	23
4.2.2.4. <i>Remoção do EVA residual impregnado no vidro.</i>	25
4.3. EXPERIMENTOS ÓPTICOS	25
4.3.1. Premissas	25
4.3.2. Aparato experimental	26

4.3.3. Medição da transmissividade total	29
4.3.4. Medição da transmissividade difusa	31
4.3.5. Medição com piranômetro para validação dos dados	33
4.3.5.1. <i>Aparato experimental</i>	33
4.3.5.2. <i>Medidas de radiação solar total incidente</i>	35
4.3.5.3. <i>Medidas de transmissividade total do vidro sodo-cálcico</i>	36
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
5.1. PROCESSO TERMOMECÂNICO	37
5.2. ENSAIOS OPTICOS DOS VIDROS RECUPERADOS	38
5.2.1. Dados obtidos da amostra A	38
5.2.2. Dados obtidos da amostra B	39
5.2.3. Dados obtidos da amostra de vidro sodo-cálcico	40
5.2.4. Resultados e análises	40
5.2.4.1. <i>Resultados e análises – Amostra A e B</i>	41
5.2.4.2. <i>Resultados e análises – Amostra de vidro sodo-cálcico</i>	42
6. CONCLUSÃO	43
7. REFERÊNCIAS	44

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o Brasil liderou a instalação de sistemas solares fotovoltaicas (FV) na América Latina. Em outubro de 2022 o Brasil atingiu 21,35 MW de potência instalada, um crescimento de 51% em relação ao total do ano anterior (ABSOLAR, 2022). Mundialmente, a energia solar FV está se tornando a melhor opção para geração de eletricidade tendo em vista a expressiva redução dos custos, o que impulsionará ainda mais o investimento nesta tecnologia nos próximos anos (IEA, 2022).

As inúmeras vantagens do emprego de sistemas de energia solar FV são indiscutíveis, atualmente é um sistema de geração de energia com custo relativamente baixo, funcionamento garantido de pelo menos 25 anos, sendo baseado na conversão direta da energia solar em energia elétrica através dos módulos FV (popularmente chamados de painéis fotovoltaicos) sem gerar qualquer tipo de resíduo poluente durante o seu tempo de operação.

Apesar desta tecnologia apresentar benefícios significativos para a sociedade quando comparada a outros sistemas de geração de energia mais tradicionais, é inevitável a produção de resíduos, riscos e impactos para o meio ambiente. Estudos apontam uma significativa quantidade destes equipamentos obsoletos nos próximos anos, e está previsto para o cenário europeu em 2036 cerca de 3 milhões de toneladas de resíduos fotovoltaicos (PADOAN; ALTIMARI; PAGNANELLI, 2019).

O vidro temperado compreende a maior fração da massa de um módulo FV, com entre 65% e 75% da composição total. Apresentando elevada estabilidade química e sendo praticamente imune à ação das intempéries climáticas, o tempo de decomposição do vidro e do módulo fotovoltaico como um todo é indeterminado. Geralmente os resíduos de vidro são depositados em aterros, o que acarreta impactos ambientais e desperdício de recursos (FU et al., 2021). Apesar da reciclagem do vidro ser considerada tecnicamente simples, ainda ocorrem vários problemas relativos à logística do processo. O resíduo de vidro utilizado como matéria-prima reciclada normalmente é pouco lucrativo, pois o custo da logística de reciclagem e do reprocessamento pode ser alto. Dessa forma, a reduzida vantagem econômica do processo de reciclagem do vidro limita o emprego massivo por empresas e indústrias

(FU et al., 2021). No entanto, o desenvolvimento de um processo de reutilização do vidro temperado, que se encontra laminado no módulo FV, apresenta um grande potencial de emprego em outros setores, agregando valor e reduzindo impactos ambientais. Um exemplo de aplicação para este vidro é a construção de estufas de cultivo protegido.

No Brasil, com o desenvolvimento da indústria petroquímica a partir da década de 1980, a grande maioria das estufas de cultivo protegido são constituídas de plástico, produzido e combinado a um número de diferentes aditivos para incorporar propriedades físico-químicas similares às apresentadas pelo vidro. Contudo, o plástico apresenta grande impacto ambiental tanto no descarte, após seu uso, quanto na própria utilização. Recentemente, a contaminação do solo e de vegetais cultivados em estufas de plástico vem chamando a atenção de pesquisadores, principalmente na China, maior produtor mundial de hortaliças plantadas em ambiente protegido. Inúmeros estudos apontam a presença de ftalatos, aditivos largamente empregados com o objetivo de aumentar a flexibilidade e a elasticidade dos materiais poliméricos (LI et al., 2021; LIU; ZHANG; WANG, 2020; ZHANG et al., 2022).

No futuro próximo, haverá grandes quantidades de módulos obsoletos, e a possibilidade da reutilização do vidro destes módulos para a construção de estufas de cultivo protegido pode ajudar a substituir os materiais poliméricos potencialmente prejudiciais à saúde. Desta maneira é possível abordar dois problemas simultaneamente, isto é, a reutilização do vidro temperado em outra aplicação nobre e a redução do uso de materiais poliméricos na construção de estufas de cultivo protegido. Além disto, a ideia de transformar o vidro reutilizado novamente em produto é atrativa tanto para a economia quanto para o meio ambiente.

2. OBJETIVOS

Nos itens abaixo são apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos definidos para este trabalho.

2.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo geral do trabalho é testar e aplicar processos termomecânicos para recuperar o vidro com a moldura de alumínio de módulos fotovoltaicos obsoletos com vistas à sua reutilização em estufas de cultivo protegido.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- (1) Desenvolver uma metodologia simples, econômica e ambientalmente segura para recuperar, de forma integral e não destrutiva, a lâmina de vidro com a moldura de alumínio;
- (2) Investigar algumas propriedades ópticas do vidro recuperado, através de medidas da transmissividade total e difusa da radiação eletromagnética no espectro visível.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

Nos itens a seguir são abordados assuntos fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

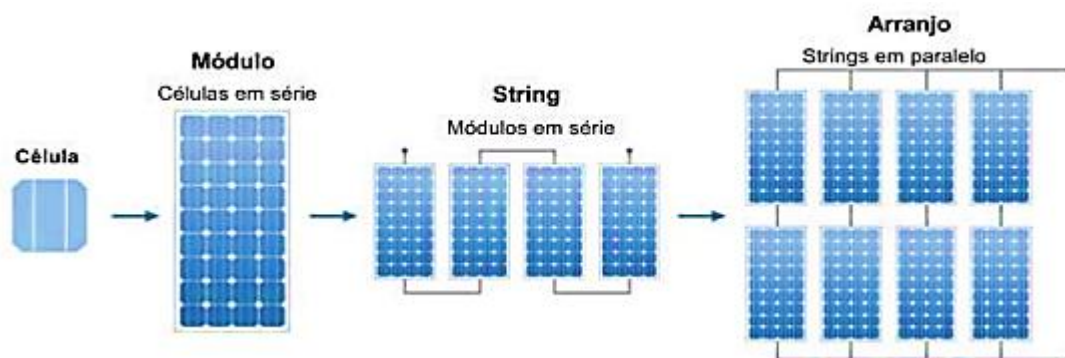
3.1. MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

A demanda crescente por eletricidade no mundo ocasionou na busca por formas alternativas de geração de energia frente aos combustíveis fósseis, como a energia solar FV.

A energia solar FV é estabelecida como a energia produzida pela conversão direta da radiação solar em eletricidade na forma de corrente contínua (CC, ou do inglês DC). As células FV são os dispositivos responsáveis por realizar a conversão da energia solar em eletricidade. O módulo fotovoltaico é a junção de células FV conectadas eletricamente em série para produzir tensão e correntes para aplicações práticas, que operam de acordo com o princípio do efeito fotovoltaico (LUQUE; HEGEDUS, 2003).

Os módulos FV são conectados em série para formar *strings*, o terminal positivo de um dispositivo é conectado ao terminal negativo do próximo, além disso, as *strings* podem ser conectadas em paralelo formando arranjos, conforme ilustra a Figura 1.

Figura 1 - Arranjo de células e módulos FV



Fonte: Your Home Australia, apud (MASCARELLO, 2017)

As células FV são classificadas de acordo com a tecnologia do material semicondutor utilizado e são divididas em três gerações:

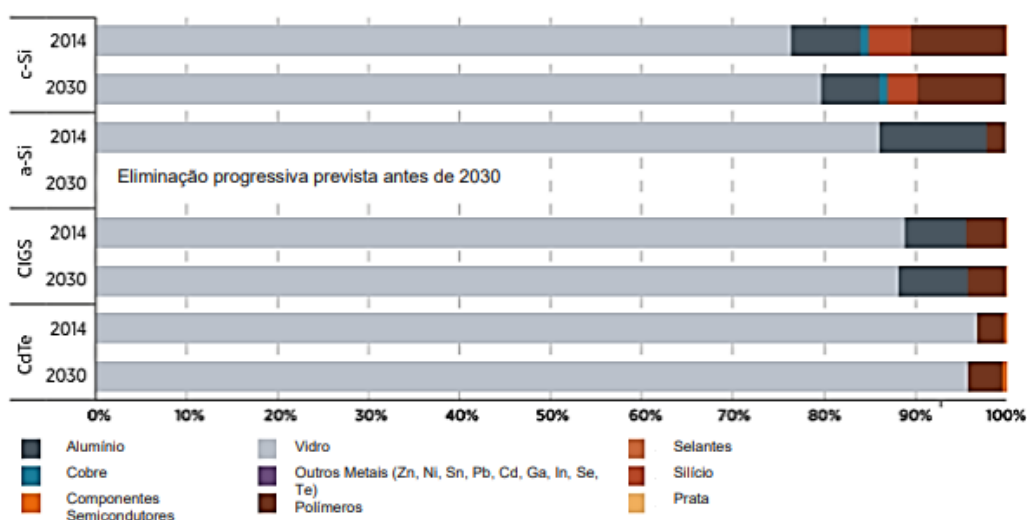
1ª geração: células FV de silício cristalino (c-Si), as células c-Si podem ser de silício monocristalino ou multicristalino, atualmente são a tecnologia mais estabelecida e difundida no mundo (LUNARDI et al., 2018)

2ª geração: células FV de filmes finos, são formados pela deposição de várias camadas finas na espessura de alguns micrometros, compostas por diferentes materiais semicondutores, as principais são de silício amorfo (a-Si), telureto de cádmio (CdTe), cobre-índio-gálio-selênio (CIGS) e cádmio-índio-selênio (DIAS, 2015; LIMA et al., 2017; MASSON et al., 2020, 2019; PINHO e GALDINO, 2014, apud CAMARGO, 2021).

3ª geração: células FV orgânicas/poliméricas, células de multijunção e células de concentração (CPV). As células FV da terceira geração encontram-se em fase de desenvolvimento com pequena disponibilidade comercial (DIAS, 2015; LIMA et al., 2017; MASSON et al., 2020, 2019; PINHO e GALDINO, 2014, apud CAMARGO, 2021).

Por meio da Figura 2, é possível visualizar a composição dos principais materiais das diferentes tecnologias dos módulos FV (c-Si, a-Si, CIGS e CdTe) do período de 2014 até 2030 (para 2030 foi realizada uma previsão). Também é possível perceber por meio da Figura 2 que o vidro é o material com maior percentual em massa na composição de todas as principais tecnologias de módulos FV.

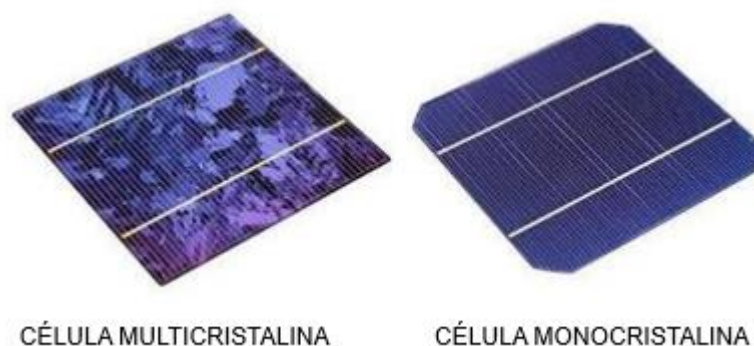
Figura 2 – Percentual em massa dos materiais utilizados em módulos FV de diferentes tecnologias



Fonte: WECKEND et al., 2016; MARINI et al., 2014; PEARCE 2014; RAITHEL 2014; BEKKELUND 2013; NREL 2011 e SANDER et al., 2007, apud CAMARGO (2021).

Os módulos FV de 1ª geração são formados geralmente por 36 a 72 células de silício cristalino interconectadas em série. As células de silício cristalino são os componentes mais relevantes dos módulos FV, e podem ser classificadas em células de silício monocristalino ou multicristalino, sendo a estrutura cristalina do silício contido na célula FV a principal diferença entre ambas: as células monocristalinas são formadas a partir de lingote monocristalino de silício, sendo empregados em módulos de maior eficiência de conversão. As células FV multicristalinas, por sua vez, são formadas por solidificação controlada e o lingote formado apresenta regiões com diferentes orientações cristalográficas. Os módulos FV construídos com estas células exibem uma eficiência ligeiramente inferior à apresentada pelos módulos com células monocristalinas (LUQUE; HEGEDUS, 2003). Entretanto para fins de reciclagem essas diferenças são irrelevantes, pois ambos são formados pela mesma matéria prima, isto é, silício com pureza grau solar, com 99,9999% de pureza, também conhecido como silício "6 noves". Na Figura 3 é possível visualizar a diferença na aparência entre as células multicristalinas e monocristalinas.

Figura 3 - Células de silício multicristalino e monocristalino.



Fonte: GLUNZ, S. W.; PREU, R.; BIRO, D., 2012, Apud PRADO, 2018

Historicamente, os módulos FV de silício cristalino (c-Si) têm sido a tecnologia mais empregada para a conversão fotovoltaica da energia solar e estão presentes na maioria dos sistemas fotovoltaicos existentes atualmente. Segundo a ISE (*Institute of Solar Energy*), em 2020, cerca de 95% da produção global do mercado fotovoltaico correspondeu a tecnologia de módulos FV c-Si, e cerca de 84% desses módulos eram compostos por células de silício monocristalino.

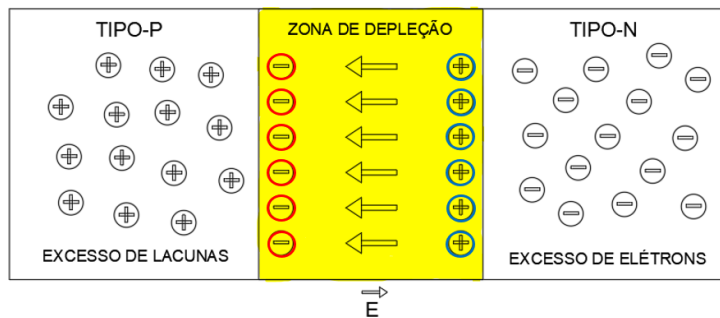
3.1.1. Princípios de funcionamento das células FV

As células FV são compostas por materiais semicondutores que passam por um processo de dopagem. Neste processo são inseridas impurezas no retículo cristalino dos materiais semicondutores, gerando materiais semicondutores do tipo p e do tipo n:

- Semicondutores do tipo n: ocorrem quando a dopagem é feita com elementos dopantes que apresentam mais elétrons de valência que a unidade cristalina original. Neste caso, o dopante estabelece níveis doadores de elétrons, aumentando a concentração de elétrons na banda de condução do material (HERSCH; ZWEIBEL, 1982) (LUQUE; HEGEDUS, 2003).
- Semicondutores do tipo p: ocorrem quando a dopagem é feita com elementos dopantes que apresentam menos elétrons de valência que a unidade cristalina original, gerando níveis aceitadores de maneira que aumenta a concentração de lacunas (também chamadas de buracos) na banda de valência do material semicondutor (HERSCH; ZWEIBEL, 1982) (LUQUE; HEGEDUS, 2003).

A célula FV é formada por semicondutores do tipo n e semicondutores tipo p. Este arranjo forma a junção p-n, que na sua formação permite que ocorra um fluxo de elétrons do semicondutor n para p por difusão. Desta forma, no semicondutor n tem-se um acúmulo de cargas positivas referentes aos íons do dopante e no semicondutor p um acúmulo de cargas negativas (elétrons preenchendo lacunas) formando íons positivos fixos na região da junção. O processo de difusão das cargas é contrabalanceado pela força elétrica devido ao campo elétrico formado pelos íons de dopantes. Na região da junção, também chamada também de zona de depleção, conforme pode ser visto na Figura 4, há a formação de um campo elétrico (LUQUE; HEGEDUS, 2003).

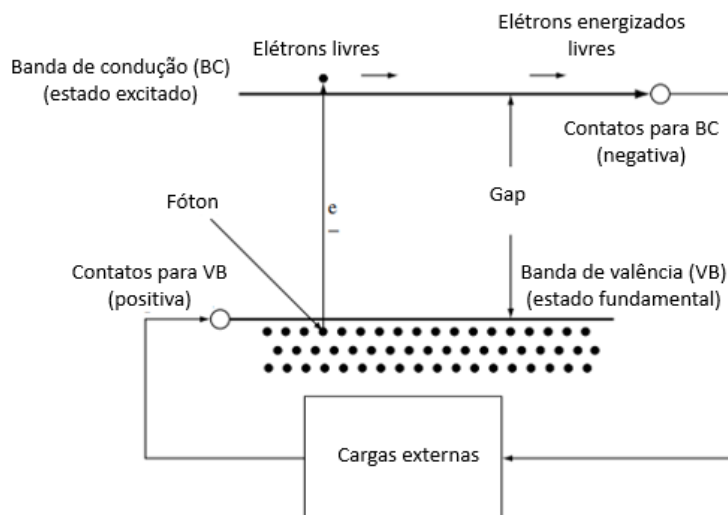
Figura 4 - Zona de depleção formada na junção p-n
- V +



Fonte: Autor, 2022.

A incidência de fótons com energia maior do que a largura da banda proibida (*band gap*) do semiconductor da célula FV permite que os elétrons sejam promovidos da banda de valência para a banda de condução, gerando um par elétron lacuna. Se o par elétron lacuna atinge a região da junção pn, os portadores de carga são separados devido ao campo elétrico da zona de depleção, produzindo uma diferença de potencial. Uma corrente elétrica é produzida pelos elétrons ao serem conduzidos pelos contatos metálicos da célula FV se uma carga estiver conectada, conforme o esquema apresentado na Figura 5.

Figura 5 - Esquema do funcionamento de uma célula FV.

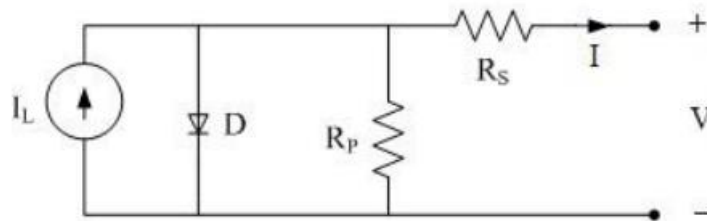


Fonte: Traduzido de LUQUE; HEGEDUS, (2003).

Após o elétron gerar trabalho útil na carga externa, ele retorna pelos contatos metálicos posteriores para a banda de valência do semiconductor p (LUQUE; HEGEDUS, 2003). Na Figura 6 é possível visualizar o circuito elétrico que representa uma célula fotovoltaica, chamado de modelo de um diodo, onde I_L é a corrente fotogerada, o diodo D representa a junção dos semicondutores p-n, a resistência R_s é

a resistência em série do material dos semicondutores e a R_p é a resistência em paralelo causada por defeitos e impurezas na célula FV (PINHO; GALDINO, 2014).

Figura 6 - Circuito elétrico esquemático de uma Célula FV



Fonte: (PINHO; GALDINO, 2014)

A partir do entendimento da operação das células FV é possível entender os princípios básicos de funcionamento dos módulos FV. Segundo a norma NBR 10899 de 2013a, a definição de módulo FV é: uma unidade base constituída por células FV, conectadas eletricamente e encapsuladas, com a finalidade de gerar eletricidade.

3.1.2. Composição dos Módulos Fotovoltaicos c-Si

Os componentes que formam o módulo FV são: moldura de alumínio, vidro temperado com baixo teor de ferro, camadas encapsulantes de EVA (acetato-vinilo de etileno ou etileno acetato de vinila), células de silício cristalino, filamentos de cobre revestidos por chumbo e estanho, contatos metálicos (prata e alumínio), *backsheet* (tedlar) e a caixa de junção (DIAS et al., 2021). A Figura 7, abaixo, exibe a disposição dos diferentes componentes de um típico módulo de silício cristalino.

Figura 7 - Componentes de um módulo fotovoltaico de silício cristalino

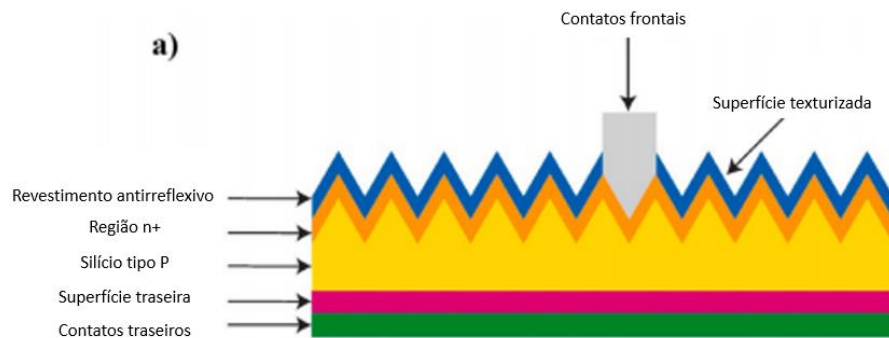


Fonte: Adaptado de FARREL et al., 2020

As células de silício são formadas a partir de lâminas de silício de alta pureza, também chamadas de bolachas ou *wafer*. Uma região da lâmina é dopada com boro, que forma uma região semicondutora tipo-p, e a outra com fósforo, que forma uma

região semicondutora tipo-n. Além disso, as células apresentam uma camada antirreflexo em sua superfície, e contatos metálicos frontais e traseiros que permitem o fluxo de elétrons. Geralmente, os contatos metálicos frontais são de prata e os traseiros são de alumínio e prata (DIAS et al., 2021). A Figura 8, abaixo, exhibe a disposição dos diferentes componentes de uma célula de silício.

Figura 8 - Estrutura da célula fotovoltaica de silício



Fonte: Traduzido de FARRELL et al., (2020).

Alguns dos materiais que constituem o módulo de silício cristalino possuem elevado valor agregado e grande interesse para reciclagem, como prata, cobre e silício (WANG, 2016). Na Tabela 1 é possível observar o percentual em massa dos componentes presentes em um módulo de silício, seus respectivos valores econômicos e os componentes de interesse para reciclagem. Segundo Dias et al., 2021, a cotação apresentada para o silício na Tabela 1 está baseada no mercado do silício metalúrgico que necessita de um grau menor de pureza.

Tabela 1 - Cotação dos Materiais contidos nos módulos fotovoltaicos de silício cristalino

Material	Percentual de material em um módulo (m%)	Preço em USD/kg do material	Há interesse na reciclagem?
Caixa de Junção	2	0,28 – 1 (unidade)	Sim
Silício	2-3	1,7 - 2,7	Sim
Vidro	69-75	0,04 - 0,167	Sim
(EVA, PVF)	7	-	Não
Cobre	0,6 - 1	4,4 - 7	Sim
Prata	0,006 - 0,06	446 - 702	Sim
Alumínio	10 - 20	1 -2	Sim
Boro	<0,1	-	Não
Fósforo	9<0,1	-	Não
Dióxido de Estanho	<0,1	-	Não
Chumbo	<0,1	-	Não

Fonte: (DIAS et al., 2021)

A camada encapsulante é um mecanismo de proteção aplicado nas células FV, composta geralmente por acetato-vinilo de etileno (EVA), que atua contra os efeitos de degradação causados pelos fenômenos climáticos como chuva, umidade, radiação ultravioleta (UV), impactos de baixa energia geralmente ocasionados por granizo e outros adventos como torções e flexões (OLIVEIRA et al., 2018). Para que essa proteção seja possível, é necessário que o material aplicado no encapsulamento tenha excelentes propriedades termoplásticas, ótima transmissão óptica no espectro solar (~380nm a ~1200nm), ótimo isolamento elétrico, boa resistência mecânica, ótima estabilidade química, ótima permeabilidade, ótima adesão/compatibilidade entre as camadas e baixo custo (PERN, 1997) (JIANG et al., 2015). Atualmente, o EVA é o material mais aplicado em encapsulamento em células FV, sendo normalmente encontrado na forma de filmes finos transparentes com 0,5 mm de espessura, e uma transmissão óptica de aproximadamente 90%. O EVA comumente utilizado é um copolímero de etileno e de acetato de vinila, com aproximadamente 10~40% de peso do acetato de vinila (CHITRA et al., 2020).

As propriedades que tornam o EVA um polímero estável física, química e termicamente, são as que tornam a reciclagem dos módulos de silício um processo tão desafiador, já que para chegar nos componentes de alto valor agregado para a

reciclagem é necessário remover primeiramente as camadas encapsulantes dos módulos FV.

3.2. RECICLAGEM DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

A vida útil dos módulos FV é de pelo menos 25 anos, algumas tecnologias apresentam até 30 anos de capacidade operacional, porém, é importante ressaltar que a vida útil dos módulos FV depende de uma série de fatores locais como: temperatura, umidade relativa do ar e taxas de radiação UV, que colaboram com o desgaste precoce dos módulos FV (KAAYA et al., 2021). Além do fim vida útil operacional dos módulos FV e seus fatores de desgaste, também existem as falhas por instalação inadequada e mau planejamento. As perdas de módulos que acabam se tornando obsoletos antes do fim de vida útil estimado são classificadas como “Perda Antecipada” e as perdas que ocorrem dentro do tempo de vida útil são classificadas como “Perda Regular”

3.2.1. Cenário de resíduos fotovoltaicos

Estimativas indicam que em 2016 a quantidade de resíduos FV acumulados no mundo atingiu cerca de 250.000 toneladas, e está previsto para 2050 cerca de 78 milhões de toneladas no cenário com perdas antecipadas e 60 milhões de toneladas no cenário de perdas regulares (WECKEND; WADE; HEATH, 2016).

Para a Ásia, espera-se o maior descarte de resíduos FV do mundo até 2030: cerca de 3,5 milhões de toneladas acumuladas. A China é o país da Ásia com o maior descarte previsto, espera-se entre 200 mil e 1,5 milhões de toneladas acumuladas até o final de 2030 (WECKEND; WADE; HEATH, 2016).

Uma pesquisa realizada por PADOAN; ALTIMARI; PAGNANELLI, 2019, demonstrou que o acúmulo de resíduos FV na região da Europa apresentará um pico elevado em 2036, aproximadamente 3 milhões de toneladas, devido ao rápido crescimento do mercado fotovoltaico que a região apresentou entre 2008 e 2011. Segundo o autor, a implantação de políticas de apoio à aplicação da tecnologia fotovoltaica deste período foi determinante para este crescimento do mercado FV. Porém, devido a uma paralisação progressiva na implementação das políticas de apoio, a quantidade de painéis instalados anualmente diminuiu a partir de 2011. O que provocou uma diminuição de resíduos fotovoltaicos previstos após 2036 na Europa.

3.2.2. Legislação e regulamentação

Os módulos FV são caracterizados como resíduos sólidos, e a avaliação de sua periculosidade se dá pelo cenário de descarte em aterro, onde são analisados os níveis de concentração de compostos lixiviados no chorume formado. A classificação dos resíduos FV pode variar conforme a concentração de substâncias tóxicas, como cádmio, chumbo, arsênio e antimônio (WECKEND; WADE; HEATH, 2016; ARYAN et al., 2018; FTHENAKIS, 2000, apud CAMARGO, 2021).

Atualmente, apenas a Europa possui uma regulamentação específica para resíduos FV. Sendo a precursora de tratamentos, coletas e reciclagem de resíduos eletrônicos e fotovoltaicos, desenvolveu regulamentações de reciclagem e as diretivas de resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos - REEE (do inglês, *Waste Eletrical and Eletronic Equipment – WEEE*) (MAJEWSKI et al., 2021).

O Brasil não possui legislação específica para a coleta e reciclagem de resíduos FV. A política nacional de resíduos sólidos apresenta o Artigo 33, que responsabiliza o consumidor de retornar os equipamentos aos importadores e fabricantes, e estes são responsabilizados por destinar os equipamentos de forma ambientalmente correta. Em 2019, foi assinado o acordo setorial de eletroeletrônicos que considera fabricantes, distribuidores e comerciantes de produtos eletroeletrônicos responsáveis por implementar sistemas de logística reversa internamente, e entre os produtos listados como equipamentos eletroeletrônicos está o módulo FV (ANNE DALLA VECHIA KONZEN; FRANCO PEREIRA, 2020). Em 2021, foi apresentado o plano nacional de energia para 2050, um dos objetivos do plano é elaborar até 2040 a regulação para a reciclagem dos resíduos FV. No Brasil, ainda não se cumpriu o tempo de descomissionamento das grandes usinas FV, porém, apesar do tempo que se dispõe é necessário propor alternativas de manejo e prevenção de impactos ambientais causados pelo descarte dos módulos FV em aterros (SANTOS; GASPARIN; RIES, 2021).

3.3. ESTUFAS DE CULTIVO PROTEGIDO

As atuais técnicas agrícolas aplicadas no mundo estão pressionando o meio ambiente. A exploração imoderada da água, desmatamentos descontrolados e uso indiscriminado de agrotóxicos e pesticidas tornam cada vez mais insustentável a

forma como os alimentos estão sendo cultivados mundialmente. É esperado um colapso nos próximos anos devido às mudanças climáticas e ao crescimento populacional, tal cenário exigirá um sistema agrícola mais produtivo dentro de um curto período (MAZZEO et al., 2021).

Fatores como temperatura, luz, água e nutrientes são cruciais para o desenvolvimento das culturas. Em ambientes controlados, o desenvolvimento das plantas torna-se fortemente vinculado à capacidade das plantas de interceptarem a luz disponível. As estufas de cultivo protegido implicam práticas e infraestruturas que proporcionam a maior incidência da luz solar em toda a extensão das plantas (NASCIMENTO, 2015).

3.3.1. Estufas de vidro difuso

Em estufas de vidro difuso, a luz é distribuída de forma mais homogênea, permitindo uma maior absorção da luz pelas plantas. As estufas de vidro difuso tendem a elevar as taxas fotossintéticas no meio e nas camadas inferiores das plantas (LI et al., 2012 apud NASCIMENTO, 2015). Além disto, permitem que a temperatura na parte superior das plantas seja menor que o habitual, o que favorece o aumento da umidade relativa no interior da estufa e um ambiente com clima mais favorável para a planta sem causar índices elevados de estresse térmico nos cultivos. Além disto, existem pesquisas que apontam a diminuição de doenças em tomates cultivados em estufas de vidro difuso (DUECK et al., apud NASCIMENTO, 2015).

A transmissividade do vidro simples utilizado em coberturas é em torno de 91% enquanto a do plástico é 78%. Porém, essa transmissividade elevada do vidro liso pode levar as plantas a sofrerem com o aumento de temperatura, causando a necessidade de maiores níveis de transpiração, o que acarreta numa diminuição da produtividade do cultivo (FARKAS ET AL., 2001 apud NASCIMENTO, 2015).

Um estudo sobre a influência do tipo de vidro na produtividade do cultivo de tomate, na Costa Visentina em Portugal, avaliou 3 tipos de vidros diferentes: vidro liso, vidro 45 e vidro 75. As plantas cultivadas na estufa de vidro liso apresentaram um consumo de CO₂ elevado em relação as plantas cultivadas nas estufas de vidro 45 e 75, isto indica que as plantas sob o vidro liso apresentaram maior atividade fotossintética. As plantas sob vidro com 45% de difusibilidade (do inglês, *Haze*) apresentaram maior

crescimento do caule, maior massa foliar e maior produtividade durante períodos de menor intensidade de radiação global do que as plantas sob vidro com 75% de difusibilidade da luz. O vidro 75 apresentou maior produtividade quando há maior disponibilidade luminosa e o vidro 45 apresenta maior produtividade na situação oposta. Ou seja, para avaliar a eficiência de um vidro difusor é necessário analisar o clima local e a intensidade da radiação global da região (NASCIMENTO, 2015).

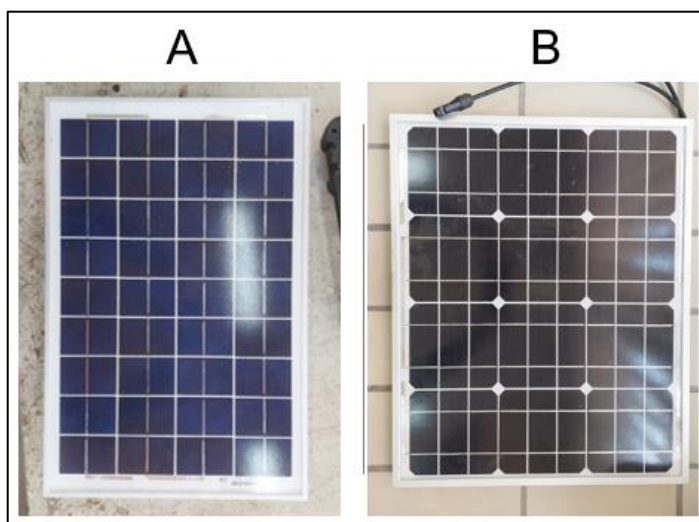
Muitos produtores belgas de tomate escolhem vidros com um fator de difusibilidade mais baixo, pois vidros com fator de difusibilidade elevados acarretam numa menor transmissão de luz direta. Este fato levou os produtores a adotarem vidros difusos *Low-Haze* (baixo fator de difusibilidade), porém, que permitem a entrada da luz direta. Outro fator relevante para o uso de vidro *Low-Haze* é o menor custo no mercado. Geralmente, os vidros aplicados em cultivo protegido apresentam fatores de difusibilidade entre 45-75%, sendo os de 50% considerados com um fator médio de difusibilidade (HOLSTEENS et al., 2020).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

O procedimento experimental deste trabalho foi baseado em duas etapas: (1) Desenvolvimento e aplicação de uma rota termomecânica, visando a recuperação íntegra do vidro com a moldura de alumínio; (2) Caracterização das propriedades ópticas do vidro voltadas para a aplicação em estufas de cultivo protegido.

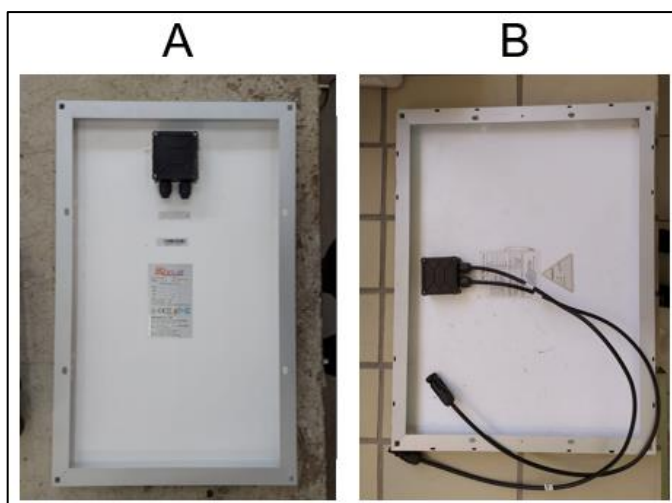
Para a realização deste trabalho foram utilizados dois módulos FV de silício cristalino, denominados de A e B, conforme ilustram as Figuras 9 e 10. As características técnicas e físicas destes módulos estão descritas no item 4.1.

Figura 9 – Vista frontal dos módulos A e B utilizados.



Fonte: Autor, 2022.

Figura 10 - Vista posterior dos módulos A e B utilizados.



Fonte: Autor, 2022.

4.1. ESPECIFICAÇÕES DOS MÓDULOS FV

Os dois módulos FV utilizados no trabalho são de silício cristalino (módulos c-Si), de fabricantes distintos, disponibilizados pelo Laboratório de Energia Solar (Labsol) da UFRGS. Suas características são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Características dos módulos A e B.

Propriedades	Módulo “A”	Módulo “B”
Potência de Pico	20 W	30 W
Tensão de Circuito Aberto	21,6 V	21,6 V
Corrente de Curto-Circuito	1,35 A	1,88 A
Tensão Máxima do sistema	1 kV	1 kV
Peso	2,5 kg	4 kg
Dimensões	450 x 350 x 30 mm	541 x 441 x 30 mm
Ano de Fabricação	-	2012
Tipo de célula FV	Silício Policristalino	Silício Monocristalino

Fonte: Autor, 2022.

Os tamanhos dos módulos coletados para o experimento são menores do que o usual, em função das dimensões da estufa disponibilizada pelo Laboratório de Química da UFRGS para realizar os ensaios termomecânicos e para facilitar o manuseio durante os procedimentos.

O módulo A não era novo e estava sem os cabos de conexão da caixa de junção, o módulo B estava novo e sem avarias.

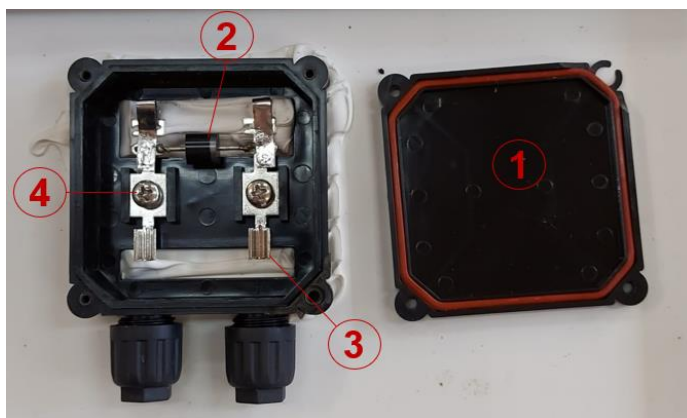
4.2. RECUPERAÇÃO DO VIDRO COM MOLDURA DE ALUMÍNIO - PROCESSO TERMOMECÂNICO

4.2.1. Análise Experimental Prévia

A análise experimental prévia foi aplicada ao módulo A, a fim de explorar empiricamente as possibilidades do processo termomecânico para separação dos materiais. Primeiramente foi removida a tampa (1), parafusos externos e componentes

internos da caixa de junção como: diodo (2), contatos metálicos (3) e parafusos dos contatos metálicos (4). Na Figura 11, é possível observar estes componentes e a caixa de junção.

Figura 11 - Caixa de junção e seus componentes



Fonte: Autor, 2022.

Após a remoção destes componentes, restou apenas a carcaça da caixa de junção que estava colada ao *backsheet* do módulo. Foi utilizado como fonte térmica um soprador de calor, e uma espátula de aço inox para descolar a carcaça da caixa de junção. Nesta etapa, a fonte térmica facilitou significativamente o processo. A Figura 12 mostra o *backsheet* do módulo A após remoção da caixa de junção.

Figura 12 – *Backsheet* do módulo A após a remoção da caixa de junção



Fonte: Autor, 2022.

O próximo passo foi verificar se o *backsheet* (Tedlar) sairia com facilidade utilizando o mesmo processo. Desta forma, foi aplicado calor em uma pequena área do módulo e, por volta dos 150°C, verificou-se a formação de bolhas de ar no *backsheet*. Com o auxílio da espátula, foi possível remover uma parte significativa do *backsheet*. Na Figura 13 é possível observar a região em que o *backsheet* foi removido

e o aspecto do mesmo, que após o resfriamento se assemelha a um polímero do tipo PET.

Figura 13 - Área do módulo A após remoção do *backsheet* (TedLar).

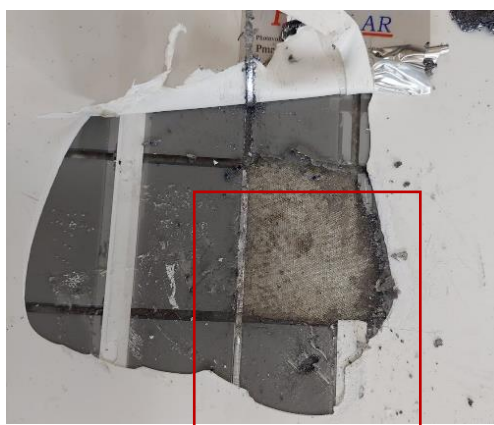


Fonte: Autor, 2022.

Após concluir que era possível remover o *backsheet* com fonte de calor e raspagem, iniciou-se o teste para remoção das camadas de encapsulante (EVA) e de células de Si, repetindo o mesmo processo. Novamente, foi aplicado calor de forma pontual numa pequena área do módulo, e por volta dos 190°C foi possível visualizar o início do amolecimento do EVA. Com o auxílio de uma espátula, removeu-se parte da camada de EVA e da camada de células de Si. Nesta etapa, foi mais difícil remover mecanicamente o EVA, devido à excelente propriedade adesiva que este copolímero apresenta.

As Figuras 14 e 15 exibem uma visão da parte traseira e da parte frontal do módulo, respectivamente, mostrando uma pequena área em que é possível visualizar o vidro. Observou-se que o vidro do módulo A apresenta uma textura rugosa.

Figura 14 – Área do Módulo A após remoção das camadas de EVA e de células de Si.



Fonte: Autor, 2022.

Figura 15 – Vista frontal do Módulo A após remoção das camadas de EVA e de células de Si, numa área pontual.



Fonte: Autor, 2022.

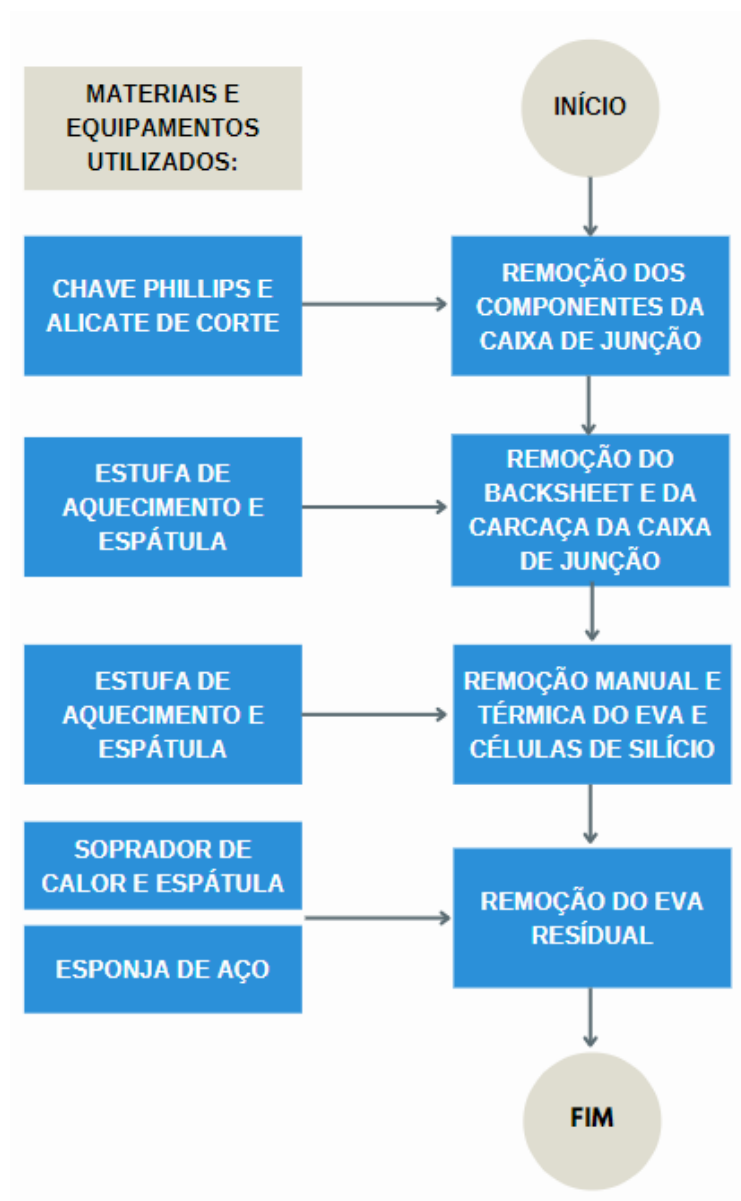
Apesar da maior dificuldade encontrada na remoção das últimas camadas (EVA e células de Si), foi possível concluir que a aplicação de um processo termomecânico para a recuperação integral do vidro com a moldura de alumínio é exequível.

4.2.2. Teste e desenvolvimento do processo termomecânico

A rota termomecânica desenvolvida para a recuperação integral do vidro com a moldura de alumínio teve como base as conclusões adquiridas a partir dos experimentos prévios apresentados no item 4.2.1.

A rota desenvolvida e aplicada, encontra-se ilustrada na Figura 16, e está dividida em 4 etapas: (1) Remoção dos componentes internos da caixa de junção, (2) Remoção da carcaça da caixa de junção e *backsheet* (Tedlar); (3) Remoção do EVA e das células de silício cristalino e (4) Remoção do EVA residual impregnado no vidro. Verificou-se a partir da análise prévia, que a remoção do polímero Tedlar e das camadas de EVA e de silício deve ser realizada em duas etapas distintas, isto é, uma etapa apenas para a remoção do Tedlar e outra para remoção do EVA e células fotovoltaicas.

Figura 16 – Diagrama do processo termomecânico desenvolvido para recuperação integral do vidro com a moldura de alumínio, mostrando os materiais/equipamentos utilizados



Fonte: Autor, 2022.

O processo térmico consiste em aquecer o módulo FV em estufa a uma dada temperatura por um determinado intervalo de tempo, e o processo mecânico consiste na raspagem manual das camadas do módulo FV com o auxílio de uma espátula e estilete.

4.2.2.1. *Remoção dos componentes internos da caixa de junção.*

A etapa de remoção dos componentes internos da caixa de junção consiste na utilização de uma chave phillips para retirar os parafusos e um alicate de corte para a remover os contatos metálicos e o diodo.

4.2.2.2. *Remoção do backsheet e da carcaça da caixa de junção.*

Inicialmente foram realizadas linhas de corte no perímetro do *backsheet* dos módulos A e B utilizando um estilete com o intuito de facilitar a remoção do *backsheet*.

Após esta preparação, os módulos foram dispostos horizontalmente, com a superfície frontal virada para baixo, dentro de uma estufa de 3,3 kW, pré-aquecida a 150 °C. A estufa empregada pode ser vista na Figura 17 e um detalhe da inserção do módulo na estufa na Figura 18.

Figura 17 - Estufa utilizada no processo térmico



Fonte Autor, 2022.

Figura 18 - Módulo A sendo colocado na estufa



Fonte: Autor, 2022.

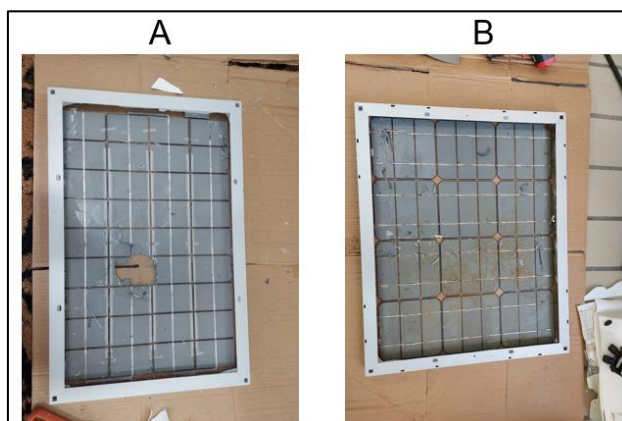
Os módulos A e B foram aquecidos por 10 minutos até a temperatura atingir 185°C, depois disto foram retirados e dispostos sobre a bancada de trabalho, à temperatura ambiente, usando um papelão para evitar choque térmico. A raspagem do *backsheet* foi realizada utilizando espátulas simples. Na Figura 19 é possível visualizar a remoção do *backsheet* e na Figura 20 é demonstrado o resultado deste processo para os módulos A e B.

Figura 19 - *Backsheet* do módulo B sendo removido



Fonte: Autor, 2022.

Figura 20 - Módulos A e B sem o *backsheet*



Fonte: Autor, 2022.

4.2.2.3. Remoção do EVA e das Células de Si.

Nesta etapa os módulos voltaram para a estufa pré-aquecida a 180°C e foram aquecidos por 10 minutos até a temperatura atingir 210°C, depois disto foram dispostos sobre a bancada de trabalho à temperatura ambiente. A raspagem do EVA e células de Si foi realizada utilizando espátulas simples. Na Figura 21 é possível

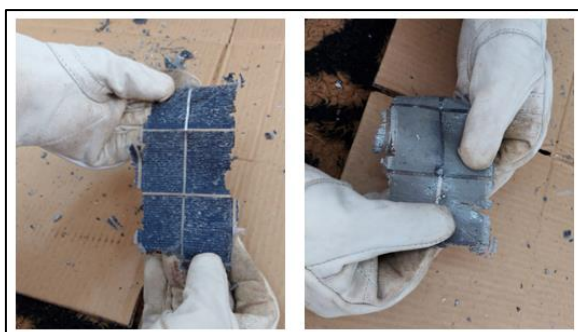
visualizar o EVA e as células de Si sendo removidos, e na Figura 22 é demonstrado estes materiais removidos.

Figura 21 - EVA e células de Si sendo removidas do módulo A



Fonte: Autor, 2022.

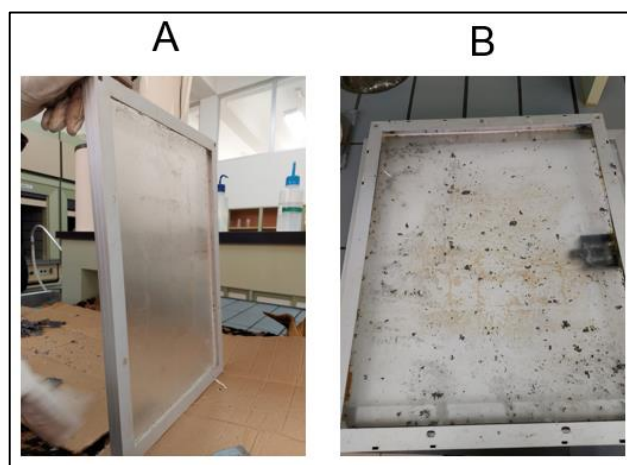
Figura 22 - Fragmentos do EVA e das células de Si após remoção do módulo A



Fonte: Autor, 2022.

Na Figura 23 é possível visualizar o vidro dos módulos A e B recuperado de forma íntegra (não destrutiva) junto à moldura de alumínio.

Figura 23 - Módulos A e B após a remoção do EVA e células de Si



Fonte: Autor, 2022.

É possível observar que o vidro do módulo A ficou mais limpo que o vidro do módulo B, apresentando menos resíduos de EVA impregnado. Um posterior processo de otimização dos parâmetros e técnicas poderá uniformizar os resultados.

4.2.2.4. *Remoção do EVA residual impregnado no vidro.*

Como visto na Figura 23, o vidro dos módulos A e B ficou com resíduo de EVA impregnado. Para este material residual, foram propostos dois processos:

- Raspagem com espátula e soprador de calor;
- Atrito com esponja de aço.

Ambos removeram significativamente o EVA impregnado, porém, a raspagem com espátula e soprador de calor demandou menos tempo e menos esforço mecânico. Na Figura 24 é possível visualizar parte do EVA impregnado removido da amostra B.

Figura 24 – Amostra B, parte do EVA impregnado removido.



Fonte: Autor, 2022

4.3. EXPERIMENTOS ÓPTICOS

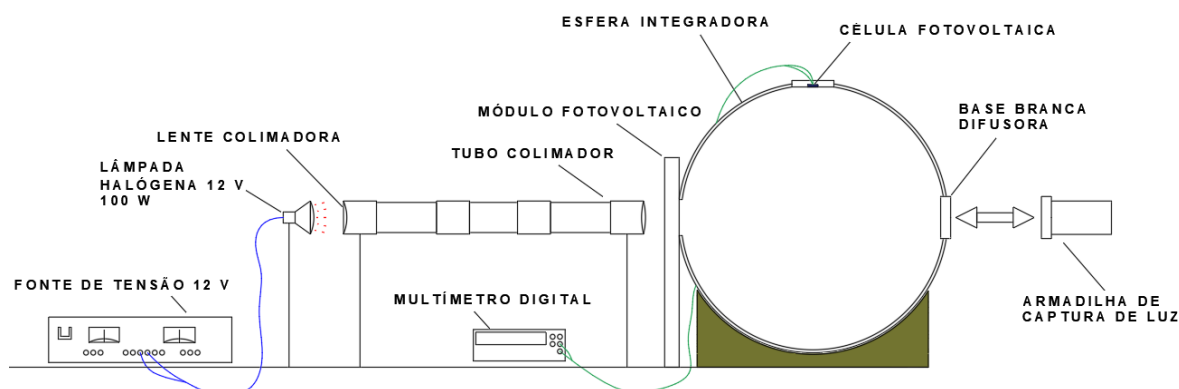
4.3.1. Premissas

A caracterização das propriedades ópticas do vidro recuperado de módulos FV foi voltada para a aplicação deste vidro em estufas de cultivo protegido (em inglês, *greenhouses*). E neste contexto, o objetivo foi simular e avaliar, o comportamento da incidência da luz solar no vidro recuperado. Para isto foram realizadas medidas de transmissividade total e transmissividade difusa no vidro recuperado dos módulos FV e numa amostra de vidro sodo-cálcico (vidro comum).

4.3.2. Aparato experimental

Para realizar as medidas de transmissividade total e transmissividade difusa foram utilizados os seguintes equipamentos: esfera integradora, tubo colimador, lente colimadora, armadilha de captura de luz direta, base branca de refletividade, lâmpada halógena de 12 V 100 W, célula FV de silício policristalino (20 mm x 16 mm), amostra de vidro sodo-cálcico (5mm de espessura), multímetro digital (Agilent – 34411A) e fonte de tensão 12V (KEPCO modelo BOP 20-20M). Os equipamentos e materiais utilizados foram disponibilizados pelo Laboratório de Energia Solar da UFRGS – LABSOL. A disposição dos equipamentos pode ser vista no desenho esquemático da Figura 25.

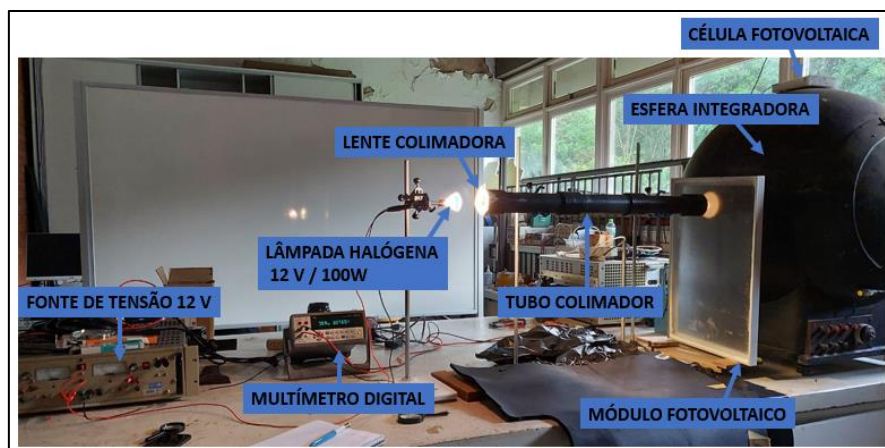
Figura 25 - Desenho esquemático do aparato experimental utilizado



Fonte: Autor, 2022.

A base branca difusora foi utilizada para as medidas de transmissividade total e a armadilha de captura de luz para as medidas de transmissividade difusa. Na Figura 26 é possível visualizar a imagem dos equipamentos utilizados.

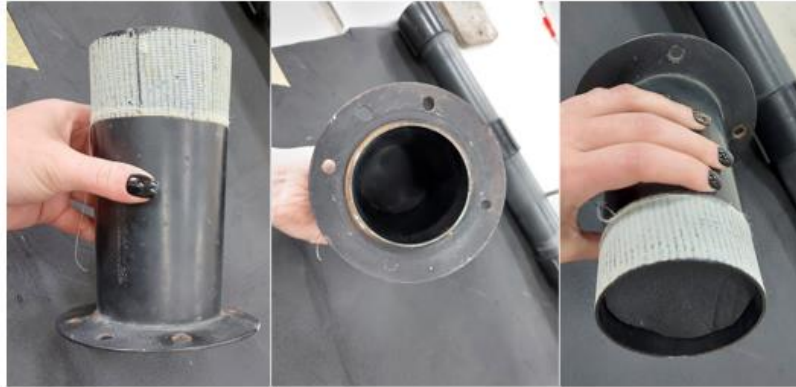
Figura 26 - Imagem do aparato experimental montado.



Fonte: Autor, 2022.

A armadilha de captura de luz e o tubo colimador foram produzidos com materiais alternativos que estavam disponíveis no laboratório. Os mesmos podem ser vistos nas Figuras 27 e 28, respectivamente.

Figura 27 - Armadilha de captura de luz utilizada.



Fonte: Autor, 2022.

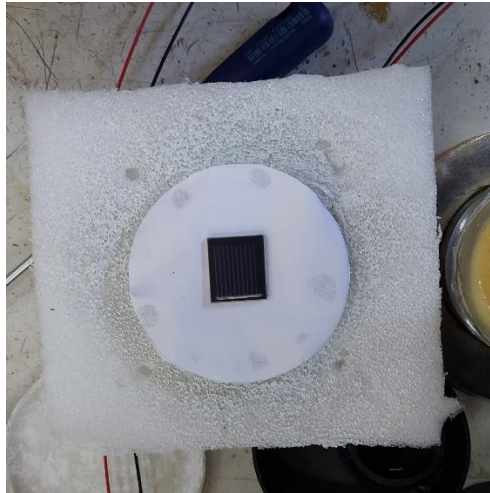
Figura 28 - Tubo colimador desenvolvido para o experimento.



Fonte: Autor, 2022.

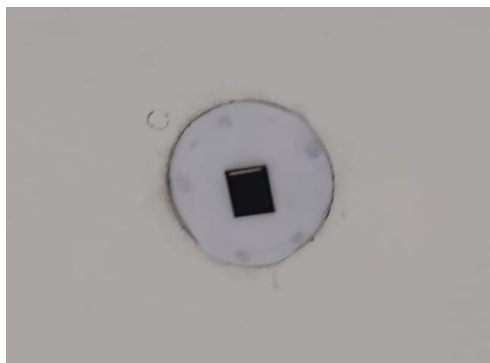
A célula FV de silício policristalino foi posicionada no interior da esfera integradora em uma das cavidades disponíveis. Para o encaixe na cavidade utilizou-se um pedaço de isopor recoberto por alumínio e papel, conforme Figura 29. Na Figura 30 é possível visualizar a imagem da célula no interior da esfera.

Figura 29 - Base para posicionamento da célula FV



Fonte: Autor, 2022

Figura 30 - Célula FV posicionada no interior da esfera integradora.



Fonte: Autor, 2022.

O interior da esfera integradora é revestido por sulfato de bário, um pó branco que serve como difusor, para que a luz incidente fosse espalhada em todos os ângulos. Na Figura 31 é possível observar o fecho de luz colimado incidindo no interior da esfera por uma das cavidades disponíveis.

Figura 31 - Interior da esfera integradora



Fonte: Autor, 2022.

A amostra de vidro sodo-cálcico (do inglês, *soda-lime glass*) foi cedida pelo laboratório, a espessura da amostra era de 5 mm, a mesma por ser vista na Figura 32.

Figura 32 - Amostra de vidro sodo-cálcico



Fonte: Autor, 2022.

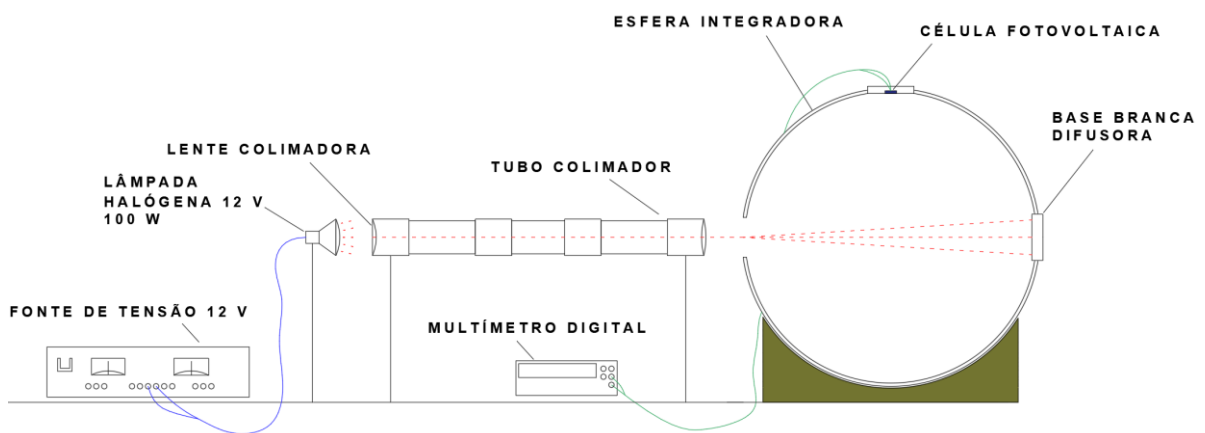
Após a organização do aparato experimental, foram realizados alguns testes prévios para verificar se os valores estavam coerentes e se seria necessário realizar ajustes nas posições dos equipamentos. Após esta etapa de testes, iniciaram as medidas de transmissividade total e difusa do vidro dos módulos FV e da amostra de vidro sodo-cálcico.

4.3.3. Medição da transmissividade total

O vidro do módulo A será chamado de amostra A e o vidro do módulo B, de amostra B neste item e nos demais itens ao longo deste trabalho.

Para a determinação da transmissividade total, foram realizadas medidas da luz incidente total na base branca difusora, na ausência das amostras, conforme o esquema da Figura 33. Esta medida foi utilizada como a “medida zero”, servindo como parâmetro de referência, sendo realizada antes e depois das medidas de transmissividade total. Entende-se que esta medida seja do estado inicial do sistema, sendo esta a esfera integradora recebendo a luz colimada sem nenhuma interferência (sem as amostras). O fecho de luz projetado na esfera nesta situação pode ser visto na Figura 31.

Figura 33 - Esquema para medição da luz incidente total.



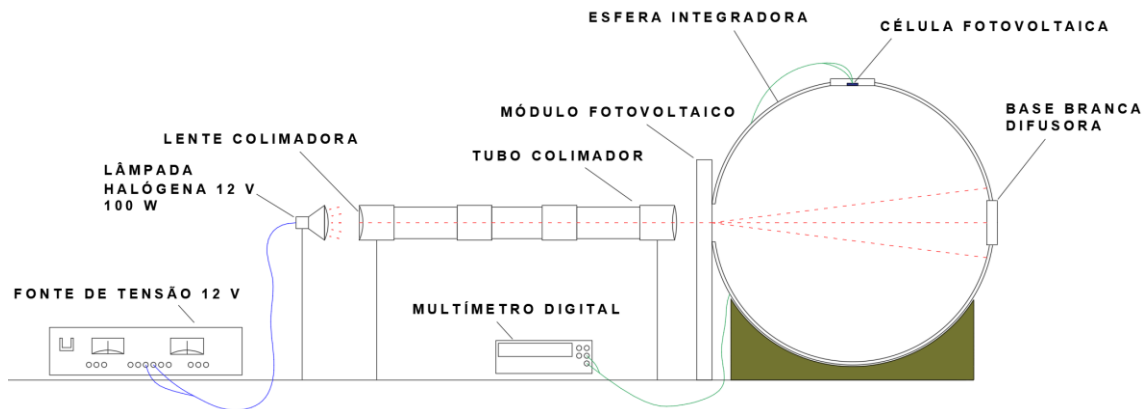
Fonte: Autor, 2022.

Foram realizados três ensaios para cada amostra (A e B), e cada ensaio com cinco repetições da medida de transmissividade total e duas medidas da luz incidente (uma inicial e uma final).

Para a amostra de vidro sodo-cálcico foram realizados 2 ensaios, e cada ensaio com três repetições da medida de transmissividade total e três medidas da luz incidente inicial.

Conforme o esquema da Figura 34, é possível visualizar o fecho de luz passando através do vidro das amostras e incidindo na esfera. Os dados foram obtidos através da medição da corrente de curto-circuito da célula FV e a leitura dos dados foi realizada por um multímetro digital com a sensibilidade ajustada para 6 dígitos.

Figura 34 - Esquema para medição da transmissividade total das amostras



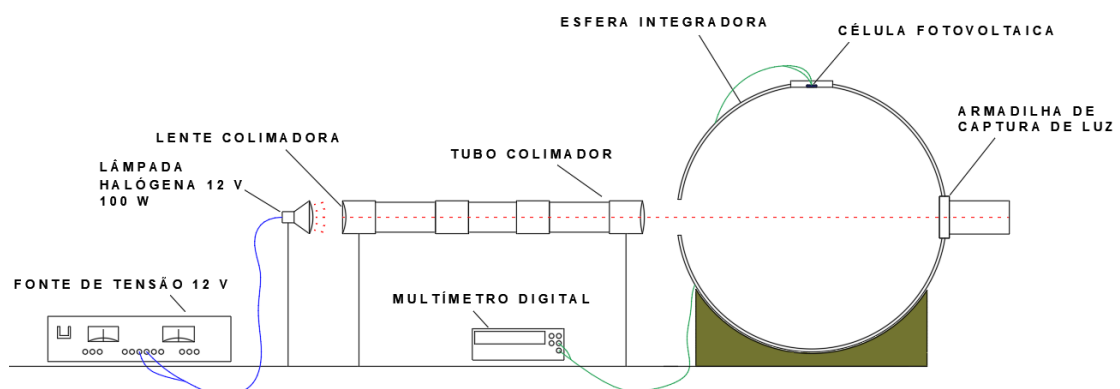
Fonte: Autor, 2022.

Estas medidas também foram realizadas para a amostra de vidro sodo-cálcico, com o intuito de realizar um comparativo com o vidro proveniente dos módulos FV.

4.3.4. Medição da transmissividade difusa

Para a determinação da transmissividade difusa, foram realizadas medidas do ruído de luz na parte interna da esfera, com a armadilha de captura de luz acoplada, conforme o esquema da Figura 35. Esta medida é necessária para subtrair a luz difusa no interior da esfera antes de realizar a medida com as amostras. Esta medição foi realizada antes e depois das medidas de transmissividade difusa das amostras.

Figura 35 - Esquema para medição do ruído.



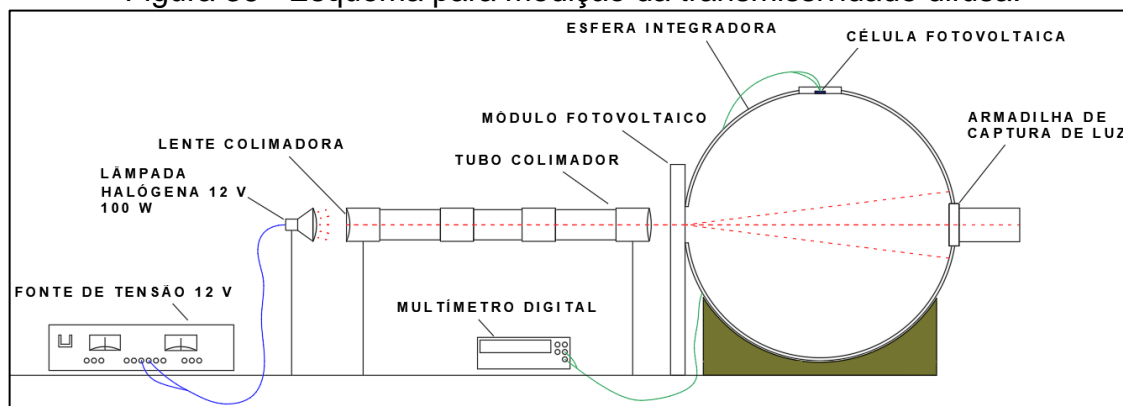
Fonte: Autor, 2022.

Foram realizados três ensaios para cada amostra (A e B), e cada ensaio com cinco repetições da medida de transmissividade difusa e duas medidas de ruído.

Para a amostra de vidro sodo-cálcico foi realizado um ensaio com duas medidas de transmissividade difusa e duas medidas de ruído.

Conforme o esquema da Figura 36, é possível visualizar o feixe de luz incidindo na amostra. Os dados foram obtidos através da medição da corrente de curto-circuito da célula FV, a leitura dos dados foi realizada por um multímetro digital com a sensibilidade ajustada para 6 dígitos.

Figura 36 - Esquema para medição da transmissividade difusa.



Fonte: Autor, 2022.

Estas medidas também foram realizadas para a amostra de vidro sodo-cálcico, com o intuito de realizar um comparativo com o vidro proveniente dos módulos FV.

4.3.5. Cálculo das grandezas

As medidas de transmissividade total e difusa foram realizadas de acordo com a norma ASTM D 1003, 1997, que apresenta o método de teste padrão para medição de neblina e transmitância luminosa de plásticos transparentes (em inglês, *Standard Test Method for Haze and Luminous Transmittance of Transparent Plastics*). Este método abrange a avaliação de propriedades de transmissão e dispersão de luz em seções planas de materiais semelhantes a plásticos transparentes. As equações 1, 2 e 3 são determinadas pela norma ASTM D 1003 para o cálculo de transmissividade total, transmissividade difusa e para o cálculo de *haze* (fator de neblina), respectivamente.

$$T_t = T_2/T_1 \quad (1)$$

$$T_d = [T_4 - T_3 (T_2/T_1)]/T_1 \quad (2)$$

$$Haze = \frac{T_d}{T_t} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

T_T : Transmissividade total;

T_d : Transmissividade difusa;

Haze: Fator de neblina;

T1: Intensidade da luz medida pelo sensor da esfera integradora sem a amostra, isto é, luz incidente total na esfera, com o refletor padrão no lado oposto da esfera;

T2: Intensidade da luz medida pelo sensor com a amostra colocada no feixe luminoso na entrada da esfera e com o refletor no lado oposto da esfera;

T3: Intensidade da luz medida pelo sensor e difundida pelo equipamento (ruído) com a armadilha de captura da radiação direta instalada;

T4: Intensidade da luz medida pelo sensor e difundida pelo equipamento e pela amostra com a armadilha de captura da radiação direta instalada.

4.3.6. Medição com piranômetro para validação dos dados

Para verificar se os dados das medições realizadas na esfera integradora não possuíam algum erro sistemático não detectado, foram realizadas medidas de transmissividade total do vidro sodo-cálcico a partir de um segundo método a fim de fazer a comparação. Para este caso, foram utilizados os materiais e dispositivos descritos no item 4.3.6.1

4.3.6.1. Aparato experimental

Os materiais e equipamentos utilizados para a validação de dados foram os seguintes: piranômetro Eppley (modelo PSP, fator de calibração $8,28 \times 10^{-6} \text{ V/Wm}^{-2}$), multímetro digital (Agilent – 34411A), amostra de vidro sodo-cálcico e cabine ajustável para exposição à radiação direta solar (os equipamentos foram disponibilizados pelo Labsol).

O piranômetro é um instrumento utilizado para realizar a medição da radiação solar, o dispositivo utilizado neste trabalho pode ser visto na Figura 37. Este instrumento mede a irradiância global (W.m^{-2}) quando nivelado ao plano horizontal. Para medir a transmissividade total de um determinado plano transparente, o piranômetro precisa estar dentro de um ambiente isolado da radiação difusa solar externa, e a amostra precisa receber radiação solar direta através de uma cavidade que isola um fecho de luz alinhado com o sensor.

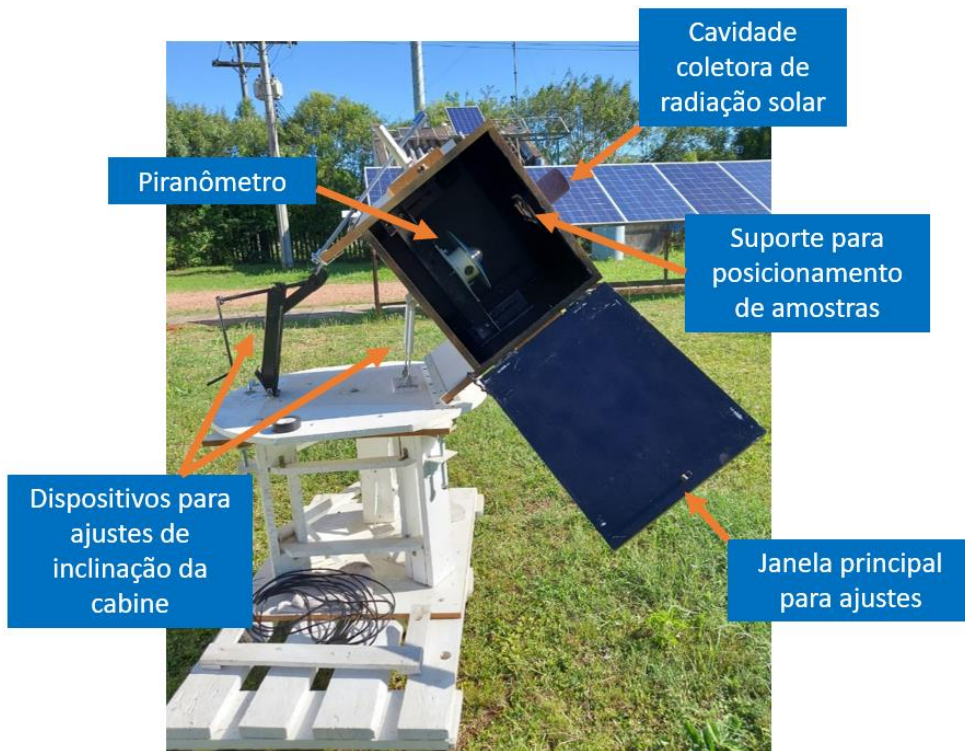
Figura 37 - Piranômetro utilizado no trabalho



Fonte: Autor, 2022.

A cabine ajustável teve a sua inclinação posicionada de forma que fosse possível isolar um fecho de luz solar incidente no piranômetro. Nas figuras 38 e 39 é possível visualizar a cabine e o piranômetro posicionados.

Figura 38 - Cabine ajustável para possibilitar incidência apenas de radiação solar direta



Fonte: Autor, 2022

Figura 39 - Piranômetro e cabine alinhados



Fonte: Autor, 2022

No interior da cabine, logo atrás da cavidade para entrada de radiação solar, foi posicionada a amostra de vidro sodo-cálcico através de um suporte disponível. Na Figura 40 é possível visualizar a amostra em posição.

Figura 40 - Amostra de vidro sodo-cálcico posicionada na cabine.



Fonte: Autor, 2022

Após posicionar o aparato experimental, iniciou-se as medidas de radiação solar total incidente e transmissividade total do vidro sodo-cálcico. Para a realização das medidas, a cabine teve as suas aberturas totalmente fechadas, tendo exposta apenas a cavidade para entrada da radiação solar direta.

4.3.6.2. *Medidas de radiação solar total incidente*

As medidas de radiação solar total incidente, também chamadas de medida “zero” neste trabalho, foram realizadas sem a amostra de vidro sodo-cálcico e com as aberturas da cabine ajustável totalmente fechadas, a radiação solar incidiu no piranômetro através da cavidade coletora de radiação.

Os dados foram obtidos através da medição da tensão do piranômetro sem a amostra, a leitura dos dados foi realizada por um multímetro digital com a precisão setada para 6 dígitos.

4.3.6.3. *Medidas de transmissividade total do vidro sodo-cálcico*

As medidas de transmissividade total foram realizadas com a amostra de vidro sodo-cálcico, e com as aberturas da cabine ajustável totalmente fechadas, a radiação solar incidiu no piranômetro através da amostra pela cavidade coletora de radiação. Os dados foram obtidos através da medição da tensão do piranômetro com a radiação incidente passando pela amostra. A leitura dos dados foi realizada por um multímetro digital com a precisão setada para 6 dígitos.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados e discussões deste trabalho foram separados em duas partes, sendo elas: (1) Resultados e análises sobre o processo termomecânico aplicado para recuperação íntegra do vidro com a moldura de alumínio; (2) Resultados e análises sobre os ensaios ópticos das amostras do vidro recuperado.

5.1. PROCESSO TERMOMECÂNICO

Durante o processo termomecânico foi possível realizar algumas observações e pontos que podem ser melhorados ao longo das etapas.

Em algumas regiões dos módulos foi possível observar pontos onde o EVA acabou queimando durante o processo térmico, isso pode ter ocorrido devido a estufa de aquecimento não aquecer de forma homogênea, gerando pontos mais quentes durante o processo.

Os cortes com estilete ao longo do perímetro do módulo contribuíram significativamente para a remoção do *backsheet* (tedlar), facilitando a remoção das extremidades que resfriavam mais rapidamente durante o processo.

O vidro dos módulos apresenta uma textura rugosa, que em algumas especificações técnicas de fabricantes de módulos fotovoltaicos é apresentado que esta textura serve para uma melhor aderência das camadas encapsulantes.

O vidro recuperado dos módulos A (policristalino) e B (monocristalino) não apresentou diferenças físicas visíveis entre si, mesmo ambos sendo de fabricantes diferentes.

De forma geral, o processo termomecânico desenvolvido se mostrou eficaz para a recuperação não destrutiva do vidro com a moldura de alumínio. Na Figura 41 é possível visualizar o vidro recuperado.

Figura 41 - Vidro do módulo recuperado com a moldura de alumínio



Fonte: Autor, 2022

Ainda sobre a Figura 41, percebe-se pela sombra projetada através do vidro recuperado que o mesmo apresenta propriedades difusoras devido a sua textura rugosa.

5.2. ENSAIOS OPTICOS DOS VIDROS RECUPERADOS

Nos itens a seguir serão apresentados os dados e as análises obtidas durante os ensaios das amostras de vidro. Os itens foram separados por amostra, primeiro serão apresentados os dados e em seguida as análises dos resultados.

5.2.1. Dados obtidos da amostra A

Na Tabela 3, estão as leituras da corrente de curto-circuito da célula fotovoltaica utilizada nos ensaios de transmissividade da amostra A.

Tabela 3 - Dados obtidos nos ensaios de transmissividade da amostra A

Ensaio 1 – Amostra A	Ensaio 2 – Amostra A	Ensaio 3 – Amostra A
Zero inicial (μA)	Zero inicial (μA)	Zero inicial (μA)
108,5	115,3	113,8
Zero final (μA)	Zero final (μA)	Zero final (μA)
108,4	115,1	114
Dados obtidos (μA)	Dados obtidos (μA)	Dados obtidos (μA)
98,1	104,7	103,4
98,6	105,1	103,6
98,2	104,9	103,3
97,9	104,8	103,1
98,6	104,9	103,6

Fonte: Autor, 2022.

Na Tabela 4, estão as leituras da corrente de curto-circuito da célula fotovoltaica utilizada nos ensaios de transmissividade difusa da amostra A.

Tabela 4 - Dados obtidos nos ensaios de transmissividade difusa da amostra A

Ensaio 1 – Amostra A	Ensaio 2 – Amostra A	Ensaio 3 – Amostra A
Ruído (μA)	Ruído (μA)	Ruído (μA)
2,7	5,8	5,8
Dados obtidos (μA)	Dados obtidos (μA)	Dados obtidos (μA)
75,8	82,2	79,2
76,1	82,6	79,3
75,9	82,3	78,9
76,2	81,3	79,5
76,5	82,0	79,5

Fonte: Autor, 2022.

5.2.2. Dados obtidos da amostra B

Na Tabela 5, estão as leituras da corrente de curto-circuito da célula fotovoltaica utilizada nos ensaios de transmissividade da amostra B.

Tabela 5 -Dados obtidos nos ensaios de transmissividade da amostra B

Ensaio 1 – Amostra B	Ensaio 2 – Amostra B	Ensaio 3 – Amostra B
Zero inicial (μA)	Zero inicial (μA)	Zero inicial (μA)
112,0	115,1	113,1
Zero final (μA)	Zero final (μA)	Zero final (μA)
110,0	114,2	113,2
Dados obtidos (μA)	Dados obtidos (μA)	Dados obtidos (μA)
98,0	100,8	99,1
98,0	101,6	99,6
98,7	101,8	100,6
96,5	100,5	100,5
97,3	100,8	99,5

Fonte: Autor, 2022.

Na Tabela 6, estão as leituras da corrente de curto-circuito da célula fotovoltaica utilizada nos ensaios de transmissividade difusa da amostra B.

Tabela 6 - Dados obtidos nos ensaios de transmissividade difusa da amostra B

Ensaio 1 – Amostra B	Ensaio 2 – Amostra B	Ensaio 3 – Amostra B
Ruído (μA)	Ruído (μA)	Ruído (μA)
6,9	7,1	5,2
Dados obtidos (μA)	Dados obtidos (μA)	Dados obtidos (μA)
80,8	83	81,2
81,4	83,1	81,7
80,6	80,2	80,7
80	80,3	79,7
78,2	80,8	78,4

Fonte: Autor, 2022.

5.2.3. Dados obtidos da amostra de vidro sodo-cálcico

Na Tabela 7, estão as leituras da corrente de curto-circuito da célula fotovoltaica utilizada nos ensaios de transmissividade da amostra de vidro sodo-cálcico.

Tabela 7 - Dados obtidos nos ensaios de transmissividade da amostra de vidro sodo-cálcico (esfera integradora)

Ensaio 1 – Amostra de vidro sodo-cálcico		Ensaio 2 – Amostra de vidro sodo-cálcico	
Zero (μA)	Valor com amostra (μA)	Zero (μA)	Valor com amostra (μA)
107,1	84,3	107,0	84,5
107,6	84,1	105,9	84,1
107,7	85,3	106,5	85,4

Fonte: Autor, 2022.

Na Tabela 8 estão os dados obtidos para os ensaios de transmissividade da amostra de vidro sodo-cálcico utilizando a metodologia com o piranômetro.

Tabela 8 - Dados obtidos nos ensaios de transmissividade da amostra de vidro sodo-cálcico (piranômetro)

Ensaio 1 – Amostra de vidro sodo-cálcico (piranômetro)		Ensaio 2 – Amostra de vidro sodo-cálcico (piranômetro)	
Zero (mV)	Valor com amostra (mV)	Zero (mV)	Valor com amostra (mV)
7,640	6,130	7,590	6,085
7,635	6,125	7,590	6,083
7,625	6,120	7,585	6,084

Fonte: Autor, 2022.

5.2.4. Resultados e análises

Neste item e nos itens seguintes serão apresentados os resultados obtidos para cada amostra apresentada anteriormente e suas respectivas análises.

5.2.4.1. Resultados e análises – Amostras A e B

Os resultados foram obtidos através das equações (1), (2) e (3) apresentadas na metodologia deste trabalho. Nas Tabelas 9 e 10 é possível observar os valores de transmissividade total (T_T), transmissividade difusa (T_d), e *Haze* (fator de difusibilidade) encontrados para a amostra A e para a amostra B, respectivamente.

Tabela 9 - Resultados obtidos da amostra A

	Ensaio 1			Ensaio 2			Ensaio 3		
	T_T (%)	T_d (%)	<i>Haze</i> (%)	T_T (%)	T_d (%)	<i>Haze</i> (%)	T_T (%)	T_d (%)	<i>Haze</i> (%)
	90,5	67,6	74,8	90,9	66,8	73,5	90,8	64,7	71,2
	90,9	67,9	74,7	91,2	67,1	73,6	91,0	64,7	71,2
	90,5	67,7	74,8	91,1	66,9	73,4	90,7	64,4	71,0
	90,3	68,0	75,3	91,0	66,0	72,5	90,5	64,9	71,7
	90,9	68,3	75,1	91,1	66,6	73,1	91,0	64,9	71,4
Média	90,6	67,9	74,9	91,0	66,7	73,2	90,8	64,7	71,3
	T_T (%)			T_d (%)			<i>Haze</i> (%)		
Média Geral	90,8			66,43			73,13		

Fonte: Autor, 2022.

Tabela 10 - Resultados obtidos da amostra B

	Ensaio 1			Ensaio 2			Ensaio 3		
	T_T (%)	T_d (%)	<i>Haze</i> (%)	T_T (%)	T_d (%)	<i>Haze</i> (%)	T_T (%)	T_d (%)	<i>Haze</i> (%)
	88,3	68,9	78,0	87,9	70,8	80,5	87,6	70,7	80,7
	88,3	69,4	78,7	88,6	70,8	79,9	88,0	71,1	80,8
	88,9	68,7	77,2	88,8	68,1	76,7	88,9	70,1	78,9
	86,9	68,2	78,5	87,7	68,3	77,9	88,8	69,2	77,9
	87,7	66,5	75,9	87,9	68,7	78,2	87,9	68,1	77,4
Média	88,0	68,4	77,7	88,2	69,4	78,7	88,3	69,8	79,1
	T_T (%)			T_d (%)			<i>Haze</i> (%)		
Média Geral	88,16			69,20			78,40		

Fonte: Autor, 2022.

Tendo em vista que vidros difusos apresentam o fator de difusibilidade entre 45 e 75%, as amostras A e B podem ser classificadas como vidro difuso com fator de difusibilidade alto (do inglês, *High Haze*), exibindo 73 e 78% de difusibilidade respectivamente.

Os vidros recuperados apresentaram características ópticas muito relevantes para a aplicação em estufas de cultivo protegido, tendo em vista que apresentaram valores de transmissividade e difusibilidade altos.

5.2.4.2. Resultados e análises – Amostra de vidro sodo-cálcico

Os resultados foram obtidos através da equação (1) apresentada na metodologia deste trabalho. Na Tabela 11 é possível observar os valores de transmissividade total encontrados para cada metodologia aplicada à amostra de vidro sodo-cálcico.

Tabela 11 - Resultados obtidos da amostra de vidro sodo-cálcico

	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 1	Ensaio 2
	Esfera Integradora		Piranômetro	
	T _T (%)	T _T (%)	T _T (%)	T _T (%)
	78,71	78,97	80,24	80,17
	78,16	79,41	80,22	80,14
	79,20	80,19	80,26	80,21
Média	78,69	79,52	80,24	80,18
	T _T (%)			
Média Geral	79,10		80,21	
Diferença entre metodologias	1,11%			

Fonte: Autor, 2022.

Os resultados obtidos do vidro sodo-cálcico se mostraram coerentes com o esperado, que era apresentar uma transmissividade total menor que o vidro difuso das amostras A e B. Vidros com baixo teor de ferro apresentam valores de transmissividade em torno de 90% e vidros comuns em torno de 80%.

Além disso, as duas metodologias aplicadas se mostraram eficazes para a determinação da transmissividade total da amostra, o segundo teste realizado com o piranômetro indicou de forma positiva a validação dos dados coletados. O percentual da diferença entre a média geral de cada metodologia aplicada ficou em 1,11%.

CONCLUSÃO

O desenvolvimento de uma rota termomecânica que preservasse o vidro e a moldura de alumínio foi bem-sucedido. Apesar dos procedimentos aplicados serem simples no ponto de vista tecnológico, é necessário automatizar a rota para que ela se torne aplicável em larga escala e economicamente lucrativa.

A moldura de alumínio foi mantida junto ao vidro recuperado pois espera-se que valorize e potencialize a aplicação desses vidros, como aberturas (claraboias e janelas), coberturas de áreas e garagens e entre outras potenciais aplicações. Para este trabalho, a moldura foi mantida para facilitar a construção de estufas de cultivo protegido, visto que a moldura apresenta furos para fixação por meio de parafusos e rebites em perfis de alumínio, madeira e entre outros, possibilitando diferente arranjos

Em relação a caracterização óptica do vidro recuperado, os ensaios realizados com as amostras recuperadas mostraram que os vidros dos módulos FV coletados são difusos, com aproximadamente 66-68% de taxa de difusibilidade (*Haze*), apresentam em torno de 90% de transmissividade total e transmissividade difusa em torno de 73 a 78%. Além disto, as medições realizadas com o piranômetro na amostra de vidro simples confirmaram de forma positiva a validação dos dados coletados, indicando que as medições realizadas na esfera integradora não possuíam erro sistemático.

As características apresentadas pelos vidros recuperados apontam um grande potencial de aplicação destes vidros em estufas de cultivo protegido. A alta difusibilidade e transmissividade apresentadas pode ser uma característica aliada à sua aplicação em diferentes climas. Embora o vidro seja caracterizado como *High Haze*, ainda assim seria válida a sua aplicação em períodos de clima com menor disponibilidade de radiação, devido a sua alta transmissividade. Para confirmar este possível potencial, seria interessante realizar um estudo sobre o cultivo de plantas com diferentes necessidades de luz em estufas construídas com vidro recuperado de módulos FV

Para estudos futuros, sugere-se quantificar de forma econômica a rota termomecânica desenvolvida, a fim de determinar valores possíveis para o produto (vidro recuperado).

6. REFERÊNCIAS

ABNT NBR 10899. Energia Solar Fotovoltaica - Terminologia. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, 4 nov. 2013.

ABSOLAR. **Infográfico - Energia Solar Fotovoltaica no Brasil**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>>. Acesso em: 14 jun. 2022.

KONZEN, B. A. D. V.; PEREIRA, A. F. GESTÃO DE RESÍDUO FOTOVOLTAICO: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE O CENÁRIO DE FIM DE VIDA DO SISTEMA. jun. 2020.

ASTM D 1003. **Standard Test Method for Haze and Luminous Transmittance of Transparent Plastics**. , jul. 1997.

CAMARGO, P. S. S. **RECICLAGEM DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DE SILÍCIO CRISTALINO: SEPARAÇÃO E CONCENTRAÇÃO DE MATERIAIS**. Porto Alegre: UFRGS, 27 maio 2021.

CHITRA et al. Structural composition and thermal stability of extracted EVA from silicon solar modules waste. **Solar Energy**, v. 211, p. 74–81, 15 nov. 2020.

DIAS, P. et al. Comprehensive recycling of silicon photovoltaic modules incorporating organic solvent delamination – technical, environmental and economic analyses. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 165, 1 fev. 2021.

FU, C. et al. Recycling of waste glass as raw materials for the preparation of self-cleaning, light-weight and high-strength porous ceramics. **Journal of Cleaner Production**, v. 317, 1 out. 2021.

HERSCH, P.; ZWEIBEL, K. **Basic Photovoltaic Principles and Methods**. GOLDEN, fev. 1982.

HOLSTEENS, K. et al. The effect of low-haze diffuse glass on greenhouse tomato and bell pepper production and light distribution properties. **Plants**, v. 9, n. 7, p. 1–15, 1 jul. 2020.

IEA. **Solar PV**. , set. 2022. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/solar-pv>>. Acesso em: 13 nov. 2022

ISE. **Photovoltaics Report**. Dec. 2022. Disponível em: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf> Acesso em: 15 nov 2022.

JIANG, S. et al. Encapsulation of PV Modules Using Ethylene Vinyl Acetate Copolymer as the Encapsulant. **Macromolecular Reaction Engineering**, v. 9, n. 5, p. 522–529, 1 out. 2015.

KAAYA, I. et al. Assessment of uncertainties and variations in PV modules degradation rates and lifetime predictions using physical models. **Solar Energy**, v. 218, p. 354–367, abr. 2021.

LIU, C.; ZHANG, Q.; WANG, H. Cost-benefit analysis of waste photovoltaic module recycling in China. **Waste Management**, v. 118, p. 491–500, 1 dez. 2020.

LUNARDI, M. M. et al. A Review of Recycling Processes for Photovoltaic Modules. **Solar Panels and Photovoltaic Materials**, 11 jul. 2018.

LUQUE, A. (ANTONIO); HEGEDUS, STEVEN. **Handbook of photovoltaic science and engineering**. 2. ed. Madrid: Wiley, 2003.

MAJEWSKI, P. et al. Recycling of solar PV panels- product stewardship and regulatory approaches. **Energy Policy**, v. 149, 1 fev. 2021.

MASCARELLO, M. C. **ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA E FINANCEIRA DE INSTALAÇÃO FOTOVOLTAICA EM INDÚSTRIA**. Porto Alegre: UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL , jul. 2017.

MAZZEO, D. et al. Solar greenhouses: Climates, glass selection, and plant well-being. **Solar Energy**, v. 230, 2021.

NASCIMENTO, D. S. **Influência do tipo de vidro de cobertura na produtividade do tomate em estufa Engenharia Agrônoma-Hortofruticultura e Viticultura**. Lisboa: Universidade de Lisboa, 2015.

OLIVEIRA, M. C. C. DE et al. **The causes and effects of degradation of encapsulant ethylene vinyl acetate copolymer (EVA) in crystalline silicon photovoltaic modules: A review**. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** Elsevier Ltd, , 1 jan. 2018.

PADOAN, F. C. S. M.; ALTIMARI, P.; PAGNANELLI, F. **Recycling of end of life photovoltaic panels: A chemical prospective on process development**. **Solar Energy** Elsevier Ltd, , 1 jan. 2019.

PERN, F. J. ETHYLENE-VINYL ACETATE (EVA) ENCAPSULANTS FOR PHOTOVOLTAIC MODULES: DEGRADATION AND DISCOLORATION MECHANISMS AND FORMULATION MODIFICATIONS FOR IMPROVED PHOTOSTABILITY. **Die Angewandte Makromolekulare Chemie**, v. 252, n. 4523, p. 195–216, 1997.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. **CEPEL CRESEB** , mar. 2014.

SANTOS, K. A. DOS; GASPARIN, F. P.; RIES, L. A. DA S. **MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DE SILÍCIO CRISTALINO: UMA ANÁLISE SOBRE SUA COMPOSIÇÃO E RECICLAGEM**. Porto Alegre: 2021. Disponível em: <<http://pev-proex.uergs.edu.br/index.php/xsiepex/index>>

WANG, T.-Y. Recycling of Solar Cell Materials at the End of Life. p. 287–317, 2016.

WECKEND, S.; WADE, A.; HEATH, G. **End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels**. MASDAR: [s.n.]. Disponível em: <www.irena.org>.

ZHANG, Q. et al. An ignored potential microplastic contamination of a typical waste glass recycling base. **Journal of Hazardous Materials**, v. 422, 15 jan. 2022.